

Einfluss dauerhafter Kennzeichnungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Bauwissenschaften,
der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dominik Jungbluth M. Sc.

aus Düsseldorf

Referentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Korreferentin: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann

Eingereicht: 18.08.2017

Mündliche Prüfung: 13.03.2018

Abteilung Bauwissenschaften der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

Institut für Metall- und Leichtbau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen.

Mein erster und ganz besonderer Dank geht an meine Doktormutter Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Natalie Stranghöner, die mich während meiner Promotion immer geführt und gefördert hat und mit ihrer Energie und Akribie zum Gelingen dieser Promotion beigetragen hat. Im Speziellen möchte ich mich für den immer sehr herzlichen und familiären und zugleich direkten und professionellen Umgang bedanken.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Frau Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danken.

Weiterhin geht mein Dank an Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Carolin Birk und Herrn Prof. André Niemann, die als Prüfer meine Disputation begleitet haben.

Den Mitarbeitern des Institut für Metall- und Leichtbau danke ich für den freundschaftlichen und kollegialen Umgang. Es ist immer eine Freude in diesem Umfeld arbeiten zu dürfen.

Nicht zuletzt geht mein Dank an meine Familie, insbesondere an meine Eltern, die mich bis hierher begleitet, gefördert und geprägt haben.

Meiner Frau Cora gilt ein großer Dank für ihre grenzenlose Unterstützung und ihren unerschütterlichen Glauben an mich.

Kurzfassung

Stahlbauteile müssen während aller Fertigungsabschnitte identifizierbar und rückverfolgbar sein. Die Wahl der Kennzeichnungsmethode ist in einschlägigen Normen nicht zwingend vorgeschrieben. In der für die Fertigung von Stahltragwerken anzuwendenden DIN EN 1090-2 ist geregelt, dass die Aufbringung von dauerhaften Kennzeichnungen nicht zu Beschädigungen des Bauteils führen darf. Weiterhin sind harte Kennzeichnungsmethoden wie Hartprägungen, gebohrte oder gestanzte Markierungen nur zulässig für Stahlsorten des Festigkeitsbereiches bis einschließlich S355 und nur in festgelegten Bereichen, in denen die Markierung keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat.

Eine Forderung nach dauerhaften Kennzeichnungsmethoden impliziert die Widerstandsfähigkeit der Markierungen gegenüber nachgeschalteten Fertigungsprozessen wie Strahlen, Beschichten oder Feuerverzinken sowie gegenüber Witterungseinflüssen. Für eine dauerhafte Kennzeichnung eignen sich insbesondere Methoden wie Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln.

Hersteller von Maschinen haben in den letzten Jahren ihre Produkte derart weiterentwickelt, dass die genannten Markiermethoden in Fertigungsstraßen eingebunden werden können. Manuelle Bearbeitungs- oder Markierprozesse wie das Anreißen von Bauteilen oder das Aufbringen von Kennzeichnungen können somit durch vollautomatische Prozesse ersetzt werden. Nichtsdestotrotz bewirken dauerhafte Kennzeichnungsmethoden eine Oberflächenveränderung und hinterlassen eine Kerbe, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Dieser Einfluss wurde bisher nicht im Detail untersucht, weshalb eine Einordnung der Markierkerben in den Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 prinzipiell nicht möglich ist.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, eine Einschätzung des Einflusses praxisüblicher dauerhafter Kennzeichnungsmethoden auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen zu erlangen, mit deren Hilfe sich die Schwere der ermüdungswirksamen Schädigung der Kennzeichnungsmethoden abbilden lässt.

Hierzu werden die durch die untersuchten Kennzeichnungsmethoden installierten Oberflächenkerben charakterisiert und spezifische Eigenschaften herausgearbeitet. Darüber hinaus werden Ermüdungsversuche an Prüfkörpern vorgestellt und interpretiert. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen umfassen Versuchsserien mit Prüfkörpern aus der im Brückenbau üblichen Stahlsorte S355J2

sowie der Stahlsorte S460N zur Abdeckung eines höheren Festigkeitsbereiches. Zur Überprüfung eines möglichen Blechdickeneffektes wurden drei verschiedene Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht.

Auf Basis der experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften der Kerben werden die vorgestellten Kennzeichnungsmethoden anhand von Finite Elemente Simulationen eingeordnet und bewertet. Mithilfe aller erarbeiteten Versuchsdaten werden Empfehlungen zur Einarbeitung der Ergebnisse in die Normung vorgestellt.

Die Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass das Ermüdungsverhalten durch aufgebrachte Kennzeichnungen negativ beeinflusst wird. Die Abnahme der Ermüdungsfestigkeit lässt sich für die meisten Kennzeichnungsmethoden auf den geometrischen Kerbeffekt infolge der Kennzeichnungen zurückführen. Demzufolge nimmt der Einfluss der Kennzeichnung auf das Ermüdungsverhalten mit zunehmender Kerbtiefe und -schärfe zu. Dennoch lassen sich infolge der Kennzeichnungen vergleichbar hohe Ermüdungsfestigkeiten erzielen, welche eine günstige Kerbfalleinordnung im oberen Bereich des Europäischen Kerbfallkatalogs zur Folge haben.

Abstract

Steel components have to be identifiable and traceable during the whole manufacturing chain. The choice of the identification method is not specified consistently in international rules and standards. EN 1090-2 specifies that the use of durable marks may not result in producing damages and that hard stamped marks are only permitted for steel grades up to S355 and only in areas where no effect on the fatigue life is expected. In terms of durability, markings should be resistant against particular manufacturing processes such as sandblasting, hot-dip galvanizing or coating. In detail these methods are hard stamping, scribing, plasma marking and needling.

Nowadays, the industry has developed machines with integrated automatic marking processes. Consequently, manual layout scribing is not required anymore during manufacturing processes of steel components and components can be marked on the fly. However, the effect of the installed notch due to the marking process on the fatigue strength of the components is questionable. As no systematic investigations on this topic have been carried out up to now, marked notch details are not covered within the detail categories of EN 1993-1-9.

For this reason, in the frame of this thesis, notches installed by the mentioned durable marking methods are characterized and specific geometrical properties are identified by three-dimensional models achieved with microscopic focus-variation technology. Furthermore, experimental fatigue tests with specimens of two different steel grades S355J2 and S460N are presented and evaluated. Three different plate thicknesses 15, 25 and 40 mm were examined to evaluate whether a size effect can be observed.

Based on the experimental investigations concerning the geometrical properties, the examined durable marking methods are classified and reviewed using finite element simulations. Regarding the results of the experimental and numerical investigations, the achieved insights are used to formulate recommendations for considering and dealing with durable marking methods.

As expected, the fatigue behaviour is influenced by the markings with a decrease of the fatigue life. The influence of markings on the fatigue life depends for most methods on the geometry and the surface conditions of the notch. Nevertheless, the achieved fatigue strengths lead into relatively high FAT classes according to EN 1993-1-9.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
------------------------------	-----------

Tabellenverzeichnis	XXIII
----------------------------	--------------

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Zusammenfassender Überblick	4
2 Stand der Technik und Wissenschaft zu Oberflächenkerben infolge Kennzeichnungen und unplanmäßigen Ungängen	7
2.1 Grundlagen / Einführung	7
2.2 Kennzeichnungsmethoden im Stahlbau	8
2.2.1 Temporäre Kennzeichnungen	8
2.2.2 Dauerhafte Kennzeichnungen	12
2.3 Oberflächenkerben infolge unplanmäßiger Ungängen	22
2.4 Ermüdungsfestigkeit gekennzeichnete Bauteile	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 Rissentstehung und Risswachstum	23
2.4.3 Ermüdungsversuch	26
2.5 Oberflächenkerben: Stand der Technik	28
2.5.1 Stand der Normung	28
2.5.2 Untersuchungen zur Ermüdung gekennzeichnete Bauteile	31
2.6 Zusammenfassung	38
3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeiten infolge dauerhafter Kennzeichnungen	41
3.1 Allgemeines	41
3.2 Herstellung und Charakterisierung der Prüfkörper	44
3.2.1 Voruntersuchungen	44
3.2.2 Hauptuntersuchungen	45
3.3 Versuchsbeschreibung	50

3.4	V Versuchsergebnisse durchgeführter Ermüdungsversuche an markierten Probekörpern	51
3.4.1	Allgemeines	51
3.4.2	Hartes Stempeln	53
3.4.3	Fräsen	59
3.4.4	Plasmamarkieren	64
3.4.5	Nadeln	73
3.5	Zusammenfassende Erläuterungen	75
4	Mikroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung dauerhafter Kennzeichnungskerben	79
4.1	Allgemeines	79
4.2	Geometrische Parameter auf Basis fokusvariiender Mikroskopie	79
4.3	Charakterisierung typischer Kennzeichnungskerben	81
4.3.1	Hartes Stempeln	81
4.3.2	Fräsen	84
4.3.3	Plasmamarkieren	91
4.3.4	Nadeln	97
4.4	Validierung der Messwerte anhand von Referenzmessungen . . .	98
4.5	Zusammenfassende Erläuterungen	104
5	Einordnung geometrischer Einflüsse von Oberflächenkerben anhand numerischer Parameterstudien	109
5.1	Allgemeines	109
5.2	Definition des Kerbspannungsfaktors	110
5.3	Idealisierung der Oberflächenkerben zur Modellbildung	111
5.4	FE-Modellierung	113
5.4.1	Modellaufbau und -parameter	113
5.4.2	Konvergenz	115
5.5	Kerbspannungsfaktoren	122
5.5.1	Allgemeines	122
5.5.2	Einfluss des Öffnungswinkels	123
5.5.3	Einfluss der Blechdicke	124
5.5.4	Einfluss der Länge der Kerbe	127
5.5.5	Nadelmarkierungen	128
5.5.6	Einfluss der Kerbtiefe und des Kerbradius	129

5.6	Berücksichtigung von nichtlinearem Materialverhalten	133
5.6.1	Allgemeines	133
5.6.2	Materialgesetz	133
5.6.3	Stützwirkung	134
5.7	Kerbwirkungszahlen	138
5.8	Zusammenfassende Erläuterungen	144
6	Einordnung der experimentellen und numerischen Untersuchungen im Hinblick auf eine Weiterentwicklung der EN 1090-2 und der EN 1993-1-9	147
6.1	Allgemeines	147
6.2	Diskussion aller vorhandenen Versuchsdaten	147
6.2.1	Einfluss der Kennzeichnungsmethode	147
6.2.2	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl und Ermüdungsfestigkeit	158
6.2.3	Einfluss der Blechdicke	159
6.2.4	Einfluss der Streckgrenze	160
6.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Normung	161
6.3.1	Allgemeines	161
6.3.2	Empfehlung zur Überarbeitung der EN 1090-2	161
6.3.3	Einordnung der Ergebnisse in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9	164
6.4	Zusammenfassende Erläuterungen	165
7	Zusammenfassung und Ausblick	167
	Literatur	175
	Anhänge	
A	Typische geometrische Parameter von Kerben infolge dauerhafter Kennzeichnungen	181
B	Datenblätter einzelner Versuchsserien	187
C	Kerbwirkungszahlen	211

Abbildungsverzeichnis

1.1 Kennzeichnungsverfahren Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln	1
2.1 Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Kennzeichnungsmethoden in der Fertigung. Farbstiftkennzeichnung (oben) und angehängte Etiketten (unten)	9
2.2 Exemplarische Darstellung gegen Feuerverzinken (a), Strahlen und Lackieren (b) sowie Pulverbeschichten (c) resistente Anhängeschilder zur Kennzeichnung	10
2.3 RFID-Chip mit Handheld-Scanner	11
2.4 Schematischer Aufbau der RFID-Technik	11
2.5 Beispiel eines mobilen Kennzeichnungsgeräts für Hartes Stempeln der Firma HILTI	12
2.6 Vollautomatische Signiermaschine (links) mit Detailansicht des Prägerades (rechts) der Firma Kaltenbach [© Kaltenbach GmbH + Co. KG]	13
2.7 Vergleich der Stempelergebnisse einer stationären (oben) und mobilen (unten) Einheit	14
2.8 Auswirkungen von Auflagefehlern mobiler Stempelpistolen auf das Markierergebnis	14
2.9 Geometrisch angepasste Markierstempel der Firma Kaltenbach [© Kaltenbach GmbH + Co. KG]	15
2.10 Beispielhafte Darstellung einer Fräsmaschine der Firma Voortmann zur Markierung von Bauteilen [6]	16
2.11 Exemplarische Darstellung eines Fräswerkzeugs	17
2.12 Vorgänge in der Metallschmelze beim Brennscheiden in Anlehnung an [7]	18
2.13 Exemplarische Darstellung einer Plasmamarkierspur mit 17 A . .	19
2.14 Direkter Vergleich der Plasmamarkierergebnisse infolge einer Markierstromstärke von 15 A (links) und 5 A (rechts)	19
2.15 Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Nadelmarkierungen .	20

2.16	Exemplarische Darstellung zweier Markiernadeln	21
2.17	Beispielhafte Darstellung eines Nadelmarkiergerätes (links) mit Nadelspitze (rechts)	21
2.18	Phasen des Risswachstums	23
2.19	Störung des Kräfteflusses durch Kerben, Risse oder Fehlstellen in Anlehnung an [9]	24
2.20	Einfluss der Zugfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit bei unter- schiedlicher Kerbwirkung in Anlehnung an [10]	25
2.21	Darstellung einer typischen Ermüdungsbruchfläche als Schema (oben) und Bruchbildfoto (unten)	26
2.22	Beanspruchungsbereiche im Dauerschwingversuch	27
2.23	Schema der Belastung eines Dauerschwingversuches	27
2.24	Auszug aus dem Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 [3]	28
2.25	Beispielfotos von Prüfkörpern mit Plasmamarkierung (oben) und Schlagstempelung (unten) [16]	33
2.26	Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durch- geführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsse- rien mit einer Markierstromstärke von 6 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]	34
2.27	Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durch- geführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsse- rien mit einer Markierstromstärke von 10 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]	35
2.28	Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durch- geführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsse- rien mit einer Markierstromstärke von 14 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]	36
2.29	Markiertiefen infolge unterschiedlicher Plasmamarkierungen [16]	37
2.30	Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstrom- stärke von 6 Ampere (oben) und 10 Ampere (unten) nach einer Behandlung durch Strahlen und Beschichten [16]	38
2.31	Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstrom- stärke von 6 Ampere (links) und 10 Ampere (rechts) nach einer Behandlung durch Strahlen und Feuerverzinken [16]	38
3.1	Geometrie der Versuchskörper	43

3.2	Beispiel der Kennzeichnungssystematik für die gestempelten Versuchskörper der <i>Voruntersuchungen</i>	45
3.3	Gewählte Markiergeometrie für plasmamarkierte sowie gefräste Versuchskörper	46
3.4	Markiergeometrie für gestempelte Versuchskörper	46
3.5	Markiergeometrie für genadelte Versuchskörper	47
3.6	Exemplarische Spannung-Dehnung-Kurven des Grundmaterials S355J2+N der Prüfsérie 355h-25	49
3.7	Exemplarische Spannung-Dehnung-Kurven des Grundmaterials S460N der Prüfsérie 460h-25	49
3.8	Servohydraulische Prüfmaschinen des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen mit Kapazitäten von 1,0 MN (links) und 1,6 MN (rechts)	50
3.9	Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung	54
3.10	Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerlinienneigung	55
3.11	Darstellung der gemeinsamen Auswertung beider Stahlsorten S355J2 und S460N für gestempelte Versuchskörper mit freier Wöhlerlinienneigung	56
3.12	Rissausgang des Prüfkörpers 355h-40-St-05 im Grundmaterial (Übergang zwischen tailliertem und eingespanntem Bereich) . . .	56
3.13	Exemplarisches Bruchbild des Prüfkörpers 460h-25-St-06 mit doppelter Markierung	56
3.14	Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 355h-15-St-02	57
3.15	Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung	61
3.16	Exemplarische Bruchbilder der gefrästen Prüfkörper 355h-40-Fr-01 mit $\Delta\sigma = 317,5 \text{ N/mm}^2$ (links) und 355h-40-Fr-04 mit $\Delta\sigma = 261,5 \text{ N/mm}^2$ (rechts)	62
3.17	Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerlinienneigung	64
3.18	Exemplarische Darstellung der Bruchbilder des gefrästen Prüfkörpers 460h-25-Fr-01	65

3.19	Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorten S235JR und S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung	66
3.20	Exemplarische Bruchbilder der plasmamarkierten Prüfkörper 355h-40-Pl-07 (links) und 355h-40-Pl-05 (rechts)	69
3.21	Bruchbilder der Versuchskörper 355v-15-Pl-09 (links) und 355v-15-Pl-10 (rechts)	70
3.22	Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerlinienneigung für Versuchskörper der Blechdicken 15 mm und 25 mm	71
3.23	Exemplarische Bruchbilder des plasmamarkierten Prüfkörpers 460h-40-Pl-06 mit Rissausgang im Grundmaterial	73
3.24	Bruchbild (links) und Bruchflächen (rechts) der mittels Nadelmarkierung markierten Stahlprobe 460v-15-Na-01	74
3.25	Ergebnisse der Ermüdungsversuche aller nadelmarkierten Versuchskörper	75
3.26	Vergleichende Darstellung der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_m$ und den Kerbfallklassen 100, 125 und 160 entsprechend DIN EN 1993-1-9 [3] unter Angabe der Streubänder für $\Delta\sigma_{c,95\%}$ und $\Delta\sigma_{c,5\%}$	76
4.1	Schematische Darstellung des Prinzips der Erstellung eines 3D-Modells aus zusammengesetzten Schichtaufnahmen mithilfe der 3D-Mikroskopie sowie maßgebende Kerbparameter	80
4.2	Übersicht der dokumentierten Markierpositionen der Mikroskopbilder des Prüfkörpers S460h-15-St-7	82
4.3	3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-St-7 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 1 aus Abb. 4.2)	83
4.4	3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-St-7 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 2 aus Abb. 4.2)	83
4.5	Gegenüberstellung zweier Querschnitte durch die Stempelmarkierung des Prüfkörpers 460h-15-St-7 am Rand der Markierung (Pos. 2) und in einem tieferen Bereich (Pos. 1)	84
4.6	3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-St-04 (links) mit Messfeldposition (rechts))	84

4.7	Gegenüberstellung dreier Querschnitte durch die Stempelmarkierung des Prüfkörpers 355v-15-St-04	85
4.8	Messfeld im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen gefräster Versuchskörper der Hauptuntersuchungen	85
4.9	3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)	86
4.10	Querschnitte durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 im Bereich des Ansatzpunktes des Fräskopfes	87
4.11	Längsschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 im Bereich des Ansatzpunktes des Fräskopfes	87
4.12	3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Fr-04 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)	88
4.13	3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Fr-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)	88
4.14	Querschnitt durch die gefräste Markierung an Position „mum“ aus Abb. 4.8 der Prüfkörper 460h-15-Fr-04 und 460h-15-Fr-07	88
4.15	Längsschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 460h-15-Fr-06	89
4.16	Schnittführung des Längsschnitts in Abb. 4.15	89
4.17	3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-Fr-04 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung	90
4.18	Übersichtsmodell der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-Fr-04 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)	90
4.19	Gegenüberstellung dreier Querschnitte durch die gefräste Markierung an Position „mum“ aus Abb. 4.8 des Prüfkörpers 355v-15-Fr-01-Uor	90
4.20	Querschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355v-15-Fr-01 unter 300-facher Vergrößerung	91
4.21	Vergleich unterschiedlicher Plasmamarkierstromstärken von (links) 10 A und (rechts) 6 A	92

4.22	3D-Modell eines Teils der plasmamarkierten Kerbe des Prüfkörpers 355h-15-Pl-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung	93
4.23	Querschnitt durch einen Teil der plasmamarkierten Markierung des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07	93
4.24	3D-Modell eines Teils der plasmamarkierten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)	93
4.25	Vergleich verschiedener Querschnitte durch die Markierspur plasmamarkierter Prüfkörper	94
4.26	Übersicht eines Teils der Plasmamarkierung des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07	94
4.27	Vergleichende Darstellung der Markierlayouts der Versuchsserien 355v-15-Pl (links) sowie 235v-15-Pl (rechts)	95
4.28	Vergleich versagensrelevanter Markiertiefen zweier Prüfkörper 235v-15-Pl-01 (links) und 355v-15-Pl-06 (rechts) anhand von 3D-Modellen	95
4.29	Querschnitt durch die Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers S235v-15-Pl-01, welcher mit einer Markierstromstärke von 15 A und einer Markiergeschwindigkeit von 6,1 m/min gekennzeichnet wurde	96
4.30	Höhenplot eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 235v-15-Pl-07	96
4.31	Querschnitt durch die Markierung des nadelmarkierten Prüfkörpers 355h-15-Na-02	98
4.32	3D-Modell eines Teils der Nadelmarkierung des Prüfkörpers 355h-15-Na-02 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)	98
4.33	3D-Modell der Referenzmessung eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 460-15-St-07 in fünffacher Vergrößerung (links) sowie Darstellung des Messbereichs (rechts)	100
4.34	Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 460-15-St-07 aus Abb. 4.33 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	100

4.35	Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 355v-15-St-04 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	101
4.36	Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gefrästen Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	101
4.37	Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gefrästen Prüfkörpers 460h-25-Fr-04 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	102
4.38	Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 355h-25-P1-07 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	103
4.39	Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 355h-25-P1-07 aus Abb. 4.38 als 3D-Modell	103
4.40	Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des genadelten Prüfkörpers 355h-15-Na-02 mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)	104
4.41	Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des genadelten Prüfkörpers 355h-15-Na-02 aus Abb. 4.40 als 3D-Modell	104
5.1	Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der <i>Hauptuntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für die FE-Berechnungen	112
5.2	Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der <i>Hauptuntersuchungen</i> aus S460N als Eingangsgrößen für die FE-Berechnungen	112
5.3	Grundsätzlicher Aufbau des FE-Modells zur Ermittlung von Kerbspannungsfaktoren	114
5.4	Parameter zur Modellierung idealisierter Oberflächenkerben zur Berechnung von Kerbspannungsfaktoren	115
5.5	Vergleich der für die FE modellierten Kerbgeometrien für Stempel-, Fräs-, und Plasmamarkierungen (links) sowie Nadelmarkierungen (rechts)	116
5.6	Darstellung der für die Vernetzung des FE-Modells erstellten vier Bereiche um die Oberflächenkerbe zur strukturierten Vernetzung	116
5.7	Darstellung des für FE-Berechnung verwendeten 20-knotigen Elements SOLID186 nach [50]	116

5.8	Übersicht der Parameter zur Steuerung der Vernetzung des FE-Modells im unmittelbaren Bereich der Kerbe. Mit: n = Elementanzahl; el = Elementkantenlänge	117
5.9	Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm anhand verschiedener Netzdichten und -verhältnisse	119
5.10	Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 0,2$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,05$ mm . . .	120
5.11	Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 3$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm anhand verschiedener Netzdichten und -verhältnisse	120
5.12	Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm unter Variation der Elementanzahl in Längsrichtung der betrachteten Kerbe	121
5.13	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Öffnungswinkels α_k der betrachteten Kerbe	123
5.14	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Blechdicken t_{gk}	124
5.15	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Kerbradius r_k für unterschiedliche Blechdicken t_{gk}	125
5.16	Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm und eines Kerbradius $r_k = 0,2$ mm für verschiedene Blechdicken	126
5.17	Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,0$ mm und eines Kerbradius $r_k = 0,8$ mm für verschiedene Blechdicken	126
5.18	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Länge der betrachteten Kerbe l_k	127
5.19	Kerbspannungsfaktoren für typische Nadelmarkierungen mit punktförmiger Kerbgeometrie in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbradien r_k und Kerbtiefen t_k mit Einordnung der vorhandenen Geometrien aus den experimentellen Untersuchungen	129
5.20	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Kerbradien r_k mit Einordnung der vorhandenen Geometrien aus den experimentellen Untersuchungen	131

5.21	Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Kerbradius r_k für unterschiedliche Kerbtiefen t_k	132
5.22	Exemplarische Darstellung der wahren Spannung-wahre plastische Dehnung-Kurven für zwei betrachtete Baustähle S355J2+N und S460N mit einer Nenndicke von $t = 25$ mm	134
5.23	Elastische (links) und plastische (rechts) Spannungsverteilung infolge einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,1$ mm unter einer Zugnormalspannung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y = 420$ N/mm ²	135
5.24	Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 0,4$ mm für verschiedene Kerbradien r_k unter Berücksichtigung linear-elastischer sowie real-plastischer Betrachtungen . . .	136
5.25	Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm für verschiedene Kerbradien r_k unter Berücksichtigung linear-elastischer sowie real-plastischer Betrachtungen . . .	136
5.26	Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S355J2	137
5.27	Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S460N	137
5.28	Definition des Kerbspannungsfaktors sowie des bezogenen Spannungsgefälles zur Bestimmung der Kerbwirkungszahl nach [8, 51]	139
5.29	Kerbwirkungszahlen in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Kerb-radien r_k für S355J2 und S460N	141
5.30	Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S355J2	143
5.31	Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S460N	143

6.1	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 15 mm mit freier Wöhlerlinienneigung	148
6.2	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 15 mm mit freier Wöhlerlinienneigung	149
6.3	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 15$ mm unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$	150
6.4	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 25 mm mit freier Wöhlerlinienneigung	151
6.5	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 25 mm mit freier Wöhlerlinienneigung	152
6.6	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 25$ mm unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$	153
6.7	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 40 mm mit freier Wöhlerlinienneigung	154
6.8	Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 40 mm mit freier Wöhlerlinienneigung für gestempelte und gefräste Versuchsserien	155
6.9	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 40$ mm unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$	156
6.10	Exemplarisches Bruchbild (oben) mit Bruchfläche (unten) des Prüfkörpers 355h-15-Na-1	157
6.11	Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für alle Versuchsserien unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$	158
6.12	Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%}$ in Abhängigkeit der Blechdicke	160

A.1	Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der <i>Hauptuntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	182
A.2	Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der <i>Hauptuntersuchungen</i> aus S355J2 als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen . .	182
A.3	Geometrische Parameter zweier Fräsmarkierungen der <i>Hauptuntersuchungen</i> aus S460N als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	183
A.4	Geometrische Parameter einer Plasmamarkierung der <i>Hauptuntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	184
A.5	Geometrische Parameter einer Nadelmarkierung als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	185
A.6	Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der <i>Voruntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	185
A.7	Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der <i>Voruntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	185
A.8	Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der <i>Voruntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	186
A.9	Geometrische Parameter einer Plasmamarkierung der <i>Voruntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	186
A.10	Geometrische Parameter einer Nadelmarkierung der <i>Voruntersuchungen</i> als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen	186

Tabellenverzeichnis

2.1	Versuchsmatrix zur Durchführung von Ermüdungsversuchen nach [16]	32
3.1	Versuchsumfang der <i>Vor-</i> und <i>Hauptuntersuchungen</i>	42
3.2	System zur Benennung der Versuchsserien und -körper	43
3.3	Versuchsprogramm im Rahmen der <i>Voruntersuchungen</i>	44
3.4	Materialkennwerte	46
3.5	Ergebnisse der Zugversuche an Flachzugproben längs zur Walzrichtung	48
3.6	Übersicht aller durchgeführten Ermüdungsversuche	52
3.7	Versuchsparameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S355J2	58
3.8	Versuchsparameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S460N	59
3.9	Versuchsparameter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S355J2	60
3.10	Versuchsparameter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S460N	63
3.11	Versuchsparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S235JR und S355J2	67
3.12	Versuchsparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper der Serie 355v-15-Pl	68
3.13	Versuchsparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S460N	72
3.14	Versuchsparameter und –ergebnisse genadelter Versuchskörper . .	74
3.15	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	77
5.1	Größenordnungen geometrischer Parameter untersuchter Oberflächenkerben infolge dauerhafter Kennzeichnungsmethoden	113

5.2	Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k und Kerbradien r_k	140
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 15$ mm . . .	150
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 25$ mm . . .	153
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 40$ mm . . .	156
6.4	Vergleich der erzielten Ermüdungsfestigkeiten in Abhängigkeit der Stahlsorte	161
6.5	Vorschläge zur Einordnung der Versuchsergebnisse in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9	165
B.1	Datenblatt Versuchsserie S355h-15-St	188
B.2	Datenblatt Versuchsserie S355h-25-St	189
B.3	Datenblatt Versuchsserie S355h-40-St	190
B.4	Datenblatt Versuchsserie S460h-15-St	191
B.5	Datenblatt Versuchsserie S460h-25-St	192
B.6	Datenblatt Versuchsserie S460h-40-St	193
B.7	Datenblatt Versuchsserie S355h-15-Fr	194
B.8	Datenblatt Versuchsserie S355h-25-Fr	195
B.9	Datenblatt Versuchsserie S355h-40-Fr	196
B.10	Datenblatt Versuchsserie S460h-15-Fr	197
B.11	Datenblatt Versuchsserie S460h-25-Fr	198
B.12	Datenblatt Versuchsserie S460h-40-Fr	199
B.13	Datenblatt Versuchsserie S355h-15-Pl	200
B.14	Datenblatt Versuchsserie S355h-25-Pl	201
B.15	Datenblatt Versuchsserie S355h-40-Pl	202
B.16	Datenblatt Versuchsserie S460h-15-Pl	203
B.17	Datenblatt Versuchsserie S460h-25-Pl	204
B.18	Datenblatt Versuchsserie S460h-40-Pl	205
B.19	Datenblatt Versuchsserie Nadelmarkierungen	206
B.20	Datenblatt Versuchsserie S355v-15-St	207
B.21	Datenblatt Versuchsserie S355v-15-Fr	208
B.22	Datenblatt Versuchsserie S235v-15-Pl	209

B.23 Datenblatt Versuchsserie S355v-15-Pl	210
C.1 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 1 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k . . .	212
C.2 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,9 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	212
C.3 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,8 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	213
C.4 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,7 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	213
C.5 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,6 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	214
C.6 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,5 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	214
C.7 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,4 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	215
C.8 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,3 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	215
C.9 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,2 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	216

C.10 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,1 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	216
C.11 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,05 \text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k	217

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im gegenwärtigen Stahlbau gewinnen effektive und effiziente Kennzeichnungsmethoden immer mehr an Bedeutung. Besonders bei komplexen Stahlkonstruktionen ist ein effektives Kennzeichnungssystem unabdingbar. In der Fertigung von Stahltragwerken ist eine lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen nicht nur vorteilhaft, sondern auch normativ gefordert. Die für die Ausführung von Stahltragwerken gültige Norm DIN EN 1090-2 [1] fordert für Bauwerke der Ausführungsklassen EXC3 und EXC4 explizit die lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Lieferung bis zum Einbau. Die auf dem Markt üblichen Markierungen reichen von Kennzeichnungen mittels Farb- oder Ätztiften über angeklebte oder angehängte Schilder bis hin zu oberflächenverändernden Methoden wie Fräsen oder Plasmamarkieren.

Kennzeichnungen, welche eine eindeutige Identifizierbarkeit von Bauteilen gewährleisten, sollten resistent gegenüber nach dem Markieren nachgeschalteter Fertigungsprozesse wie Strahlen, Verzinken oder Lackieren sein. Hierbei stoßen Farb- und Schildmarkierungen schnell an ihre Grenzen. Für eine dauerhafte und widerstandsfähige Kennzeichnung sind daher oberflächenverändernde Markierungsmethoden zu empfehlen. Hierbei kommen in der Baupraxis im Wesentlichen die Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln zum Einsatz, siehe Abb. 1.1.

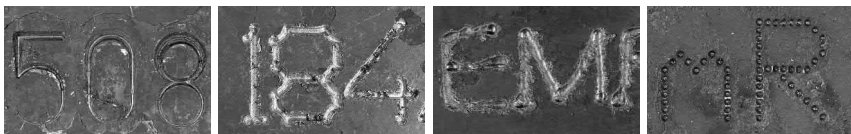


Abb. 1.1 Kennzeichnungsverfahren Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln

Neben der Resistenz gegenüber nachgeschalteten Fertigungsprozessen bieten diese Methoden den Vorteil, dass sie sich teilweise vollautomatisch in Produktions- und Fertigungsstraßen einbinden lassen. Seitens der Maschinenhersteller wurden

bereits diverse Kennzeichnungstools entwickelt und auf den Markt gebracht, die diese Anforderung erfüllen. So werden häufig Fräs- und Plasmamarkierungen vollautomatisch auf Basis von CNC-Daten auf Werkstücke aufgebracht. Des Weiteren existieren für Stempel- und Nadelmarkierungen neben stationären auch mobile Geräte, welche praktisch überall eingesetzt werden können. Mit verbindlicher Einführung der DIN EN 1090-2 [1] wurden bezüglich der Kennzeichnung und Rückverfolgbarkeit von Stahlbauteilen neue Regelungen wirksam, welche im Gegensatz zu der bis dahin gültigen DIN 18800-7 [2] deutlich verschärfte Anforderungen an die Fertigung und Planung von Bauteilen stellen.

Gemäß DIN EN 1090-2 sind dauerhafte Kennzeichnungsmethoden nur für Stahlsorten der Festigkeitsklassen bis einschließlich S355 und nur in festgelegten Bereichen zugelassen, in denen kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erwarten ist. Ferner dürfen dauerhafte, also oberflächenverändernde, Kennzeichnungsmethoden nur eingesetzt werden, sofern sie bei der Aufbringung keine Schädigung am Bauteil bewirken. Eine eindeutige Definition, was genau unter Beschädigungen zu verstehen ist, wird nicht gegeben. Als Problem in der Praxis stellt sich hier besonders die Tatsache heraus, dass sich natürlich bei jeder eingebrachten Kerbe eine mehr oder weniger schwere Schädigung der Oberfläche einstellt, welche nach aktuell gültiger Normungslage nicht zulässig ist. Weiterhin entwickelt sich aus dieser strengen Vorgabe die Frage, wie mit Ungenzen in Bauteilen umgegangen werden muss, welche nicht planmäßig, sondern unplanmäßig während der Fertigung eingebracht werden. Bei der Verarbeitung von Stahlblechtafeln und Profilen kommt es häufig zu solchen Kerben, wenn Bauteile beim Verladen oder Transportieren übereinander schleifen oder mittels Greifarmen verladen werden. Die daraus resultierenden Kerben sind zwar in der Regel weniger tief als planmäßige Kennzeichnungen, können aber dennoch eine hohe Kerbschärfe aufweisen. Hier ergibt sich in der Praxis zwangsläufig ein erheblicher Mehraufwand, da solche Fehlstellen bei der Fertigung derzeit in der Regel ausgeschliffen werden.

Inwieweit die infolge der Kennzeichnungsmethoden hervorgerufenen Kerben einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Stahlbauteilen haben, wurde bisher nicht hinreichend untersucht, weshalb sich die Frage stellt, inwieweit die Ermüdungsfestigkeit infolge dieser Kennzeichnungen herabgesetzt wird und ob Erkenntnisse gewonnen werden können, welche eine Entschärfung der aktuellen Regelungen zulassen.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss infolge verschiedener Markierverfahren eingebrachter Kerben auf die Lebensdauer von Stahlbauteilen gezielt ermittelt. Neben der global betrachteten Schädigung geht es hierbei insbesondere um die Frage, welche Faktoren die Ermüdungsfestigkeit am stärksten beeinflussen. Die Beantwortung dieser Frage soll langfristig Vorschläge zur Überarbeitung der DIN EN 1090-2 [1] sowie der DIN EN 1993-1-9 [3] geben. Denkbare Einflussparameter sind neben den unterschiedlichen Geometrien mit abweichenden Kerbschärfen und Kerbtiefen auch Einflüsse infolge unterschiedlicher Stahlsorten und Blechdicken.

In der vorliegenden Arbeit soll daher der Einfluss der vier in der Praxis üblichen Kennzeichnungsverfahren Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile quantitativ ermittelt werden. Primär wird die Ermüdungsfestigkeit mithilfe von Ermüdungsversuchen an markierten Prüfkörpern identifiziert. Abgrenzend zu bereits durchgeführten Untersuchungen werden Blechdicken größer 15 mm, wie sie im Stahlbau üblich sind, sowie die Stahlsorten S355J2 und S460N untersucht. Die Auswertung der Versuche soll insbesondere Erkenntnisse darüber liefern, inwieweit die vorhandenen Blechdicken und/oder die erzielten Markiertiefen das Ermüdungsverhalten beeinflussen.

Die experimentellen Untersuchungen und Auswertungen sind am Institut für Metall- und Leichtbau (IML) der Universität Duisburg-Essen im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ als IGF-Vorhaben 17218 N des Deutschen Ausschuss für Stahlbau e.V. (DAST), gefördert durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, durchgeführt worden.

Ergänzend zu den durchgeführten Ermüdungsversuchen sollen die Effekte weiterer Parameter auf Basis numerischer Untersuchungen ermittelt werden. Hierzu werden entsprechende Simulationen anhand eines parametrisierten FE-Modells durchgeführt und erörtert. Mithilfe der finiten Elemente soll insbesondere überprüft werden, ob sich bereits bekannte Parameter wie Kerbspannungsfaktoren

oder Kerbwirkungszahlen für die Beurteilung einer Kerbe infolge dauerhafter Kennzeichnungen eignen.

Basierend auf den experimentellen und numerischen Untersuchungen sollen Empfehlungen zur Handhabung der Markiermethoden Fräsen, Hartes Stempeln, Nadeln und Plasmamarkieren ausgearbeitet werden, die kurzfristig in die Kommentare zu den Ausführungsnormen eingebunden werden können und langfristig in die Überarbeitung der DIN EN 1090-2 und DIN EN 1993-1-9 einfließen sollen.

1.3 Zusammenfassender Überblick

Kapitel 2 liefert zunächst einen Einstieg in die Thematik der Ermüdung gekennzeichneter Bauteile. Dargestellt wird der Stand der Technik zur Thematik der derzeit gängigen temporären und dauerhaften Kennzeichnungsmethoden im Stahlbau, der Ermüdungsfestigkeit insbesondere gekennzeichneter metallischer Bauteile, der aktuellen wissenschaftlichen Untersuchungen zur Thematik gekennzeichneter Bauteile sowie der aktuelle Stand der europäischen und nationalen Normung.

Darüber hinaus wird in **Kapitel 3** der Einfluss der dauerhaften Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit gekennzeichneter Prüfkörper mithilfe von Ermüdungsversuchen untersucht, die zu einem Großteil im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ am Institut für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen durchgeführt wurden. Gegenstand der Untersuchungen sind die vier erwähnten Kennzeichnungsmethoden, welche auf Prüfkörper der zwei Stahlsorten S355J2 und S460N mit Blechdicken von 15 mm, 25 mm und 40 mm aufgebracht wurden. Die Bewertung der Versuche wird im Anschluss auf Basis aller vorhandenen Versuchsdaten aus der Ermittlung der Kennzeichnungsgeometrien sowie der Ermüdungsfestigkeiten durchgeführt.

Die Bestimmung und Klassifizierung der geometrischen Parameter untersuchter dauerhafter Kennzeichnungsmethoden wird in **Kapitel 4** erläutert. Die geometrischen Parameter geben Aufschluss über mögliche Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten. Die zerstörungsfreien Messungen wurden mittels fokusvariiender Mikroskopie durchgeführt und anhand unabhängiger Referenzmessungen validiert.

Auf Basis der durchgeführten experimentellen Untersuchungen werden in **Kapitel 5** die Untersuchungen auf numerischer Basis auf nicht experimentell untersuchte Parameter erweitert. Insbesondere wird überprüft, inwiefern sich linear-elastische Berechnungen zur Einschätzung der ermüdungswirksamen Schädigung durch die Oberflächenkerben eignen. Die Berechnungen werden anhand von Simulationen mit real-plastischem Materialgesetz eingeordnet.

Empfehlungen zur Weiterentwicklung der EN 1090-2 erfolgen auf Basis der experimentellen und numerischen Untersuchungen in **Kapitel 6**. Für EN 1090-2 ist eine Definition und klare Abgrenzung der Begriffe „Hartprägung“ und „Weichprägung“ ebenso von Interesse wie die Erweiterung erlaubter Grenzen dauerhafter Kennzeichnungen. Darüber hinaus wird ein erster Vorschlag zur Einteilung der Kennzeichnungsmethoden in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9 präsentiert.

Abschließend erfolgt in **Kapitel 7** eine Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen, der resultierenden Schlussfolgerungen sowie ein Überblick über zukünftig zu klärende Fragestellungen.

Einige Abschnitte der vorliegenden Arbeit haben auch in den Schlussbericht und somit in den entsprechenden DAST-Forschungsbericht zu bereits erwähntem IGF-Forschungsvorhaben 17218 N „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ [4] Eingang gefunden. Daher sind korrespondierende Abschnitte ähnlich und entsprechen sich teilweise.

2 Stand der Technik und Wissenschaft zu Oberflächenkerben infolge Kennzeichnungen und unplanmäßigen Ungängen

2.1 Grundlagen / Einführung

Dauerhafte Kennzeichnungen im Stahlbau stellen sich in der Regel als oberflächenverändernde Maßnahme dar, welche durch Materialentnahme oder plastische Verformung den Gefügezustand an der Oberfläche verändern und eine Kerbe in das Bauteil eintragen. Die Art und Ausprägung der Kerbe hängt im Wesentlichen von der verwendeten Kennzeichnungsmethode ab. Neben diesen planmäßig eingetragenen Kerben können im Bauteil während der Fertigung auch unplanmäßige und vergleichsweise kleine Ungängen entstehen, welche jedoch in der Regel eine hohe Kerbschärfe aufweisen. Beide Arten von Kerben sind derzeit nur eingeschränkt zulässig. Die Wirkung auf die Lebensdauer des jeweiligen Bauteils ist weitgehend ungeklärt. Aus diesem Grund ist der Einsatz dauerhafter Kennzeichnungsmethoden stark eingeschränkt.

Die im Stahlbau üblichen Kennzeichnungsmethoden werden im Folgenden im Allgemeinen sowie die vier im Stahlbau üblichen dauerhaften Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln im Speziellen näher erläutert und beschrieben.

Dauerhafte Kennzeichnungsmethoden unterscheiden sich deutlich in Anwendung und Ergebnis, weshalb die Details und Parameter der Verfahren vorgestellt werden. Zudem wird das Thema der unplanmäßigen Ungängen in diesem Zusammenhang aufgegriffen. Die Vorstellung dauerhafter Kennzeichnungen basiert maßgeblich auf den Arbeiten in [4], weshalb sich entsprechende Abschnitte ähneln.

Eine Einführung in die Thematik der Ermüdung von Baustählen stellt einen weiteren Einstieg dar.

Dauerhafte Kennzeichnungen im Stahlbau werden häufig entweder direkt oder indirekt normativ gefordert, wenn sich die eindeutige Identifizierbarkeit nicht durch die reine Formgebung oder Loskennzeichnung gewährleisten lässt. Die

Normentexte sind jedoch teilweise nicht stringent und widersprechen sich in wenigen Fällen. Aus diesem Grund wird die aktuelle Normenlage in Bezug auf Rückverfolgbarkeit und Identifizierbarkeit von Bauteilen, im Speziellen jedoch von dauerhaften Kennzeichnungsmethoden, eingeordnet und erläutert.

2.2 Kennzeichnungsmethoden im Stahlbau

2.2.1 Temporäre Kennzeichnungen

Derzeit existiert eine Vielzahl an Kennzeichnungsmethoden für Stahlbauteile. Diese reichen von Markierungen mittels Farb- oder Ätztiften über angehängte Schilder, siehe Abb. 2.1, oberflächenverändernde Markierungen bis hin zu automatisierten RFID-Chips direkt im oder am Bauteil.

Jede Methode hat Vor- und Nachteile, welche bei der Auswahl berücksichtigt werden sollten. Gerade Markierungen mit Farb- oder Ätztiften sind besonders einfach und ohne großen Aufwand aufzutragen, haben aber den Nachteil, dass sie nicht resistent gegenüber nachgeschalteten Bearbeitungsschritten oder Witte-rungseinflüssen (Verunreinigungen, UV-Licht etc.) sind. Häufig werden sie zum Kennzeichnen von Bauteilen innerhalb der Produktion und Fertigung eingesetzt. Meist werden hier temporäre werkseigene Informationen aufgebracht, welche ausschließlich für die nächsten oder weiteren Bearbeitungsschritte erforderlich sind.

Angehängte Schilder, siehe Abb. 2.2, sind sowohl in der Applikation als auch im Informationsgehalt sehr flexibel. Etiketten, welche in der Regel aus Kunststoff- oder Blechschildern bestehen, können quasi mit jeglichen Informationen, wie Positionsnummer, Stahlsorte, Loskennzeichnung etc. versehen werden. Darüber hinaus kann mit Barcodes bzw. DataMatrix Codes der Informationsgehalt noch einmal deutlich vergrößert und Prozessabläufe durch halb- oder vollautomatische Bearbeitung beschleunigt werden. Mithilfe dieser Barcodes können wesentlich mehr Informationen pro Fläche untergebracht werden. So ist es beispielsweise denkbar, zu Bauteilen gehörende Dokumente wie Abnahmeprüfzeugnisse und Auszüge von Ausführungsunterlagen (Bauteilzeichnungen, statische Berechnungen) indirekt in den Barcodes in Form von Hyperlinks zu Einträgen in entsprechenden Datenbanken zu hinterlegen. Mithilfe von geeigneten Lesegeräten können so alle notwendigen Informationen zu jedem Bauteil zu jedem Zeitpunkt abgerufen und



Abb. 2.1 Exemplarische Darstellung unterschiedlicher Kennzeichnungsmethoden in der Fertigung. Farbstiftkennzeichnung (oben) und angehängte Etiketten (unten)

weiterverarbeitet werden. Diese Methodik setzt allerdings ein entsprechendes IT-Netzwerk, wie ein ERP-System, innerhalb des Betriebes voraus, welches sowohl Lese- und Schreibgeräte als auch Datenbanken miteinander verbindet, siehe [5]. Zudem bieten codierte Informationen den Nachteil, dass sie ausschließlich mit entsprechenden Geräten ausgelesen werden können.

Mittlerweile sind am Markt auch Schilder erhältlich, welche resistent gegenüber den verschiedenen Fertigungsprozessen Feuerverzinken, Beschichten oder Strahlen sind. Diese in Abb. 2.2 dargestellten Schilder besitzen spezielle Beschichtungen und/oder Materialeigenschaften, welche sie unempfindlich gegen die entsprechenden Bearbeitungsprozesse machen.

Entscheidender Nachteil der Schilder ist die fehlende Dauerhaftigkeit. Schilder sind im Gegensatz zu dauerhaften Kennzeichnungsmethoden zwar direkt, aber nicht dauerhaft mit dem Bauteil verbunden, wodurch sie lediglich als temporäre Methoden eingestuft werden können und auch als solche zum Einsatz kommen.



Abb. 2.2 Exemplarische Darstellung gegen Feuerverzinken (a), Strahlen und Lackieren (b) sowie Pulverbeschichten (c) resistente Anhängeschilder zur Kennzeichnung

Zusätzlich sind Schilder jeweils nur gegen ein bis zwei Fertigungsprozesse gleichzeitig resistent, so dass sie vor jeder Bearbeitung erneuert werden müssen. Dies birgt vor allem beim Austausch von Schildern das Risiko für Verwechslungen.

Bei sogenannten RFID-Chips handelt es sich um Datenchips, welche in der Regel auf das Bauteil aufgeklebt oder angehängt werden, siehe Abb. 2.3. Eine Einbindung von RFID-Chips direkt ins Material ist wünschenswert, allerdings mit Schwierigkeiten verbunden. So sind die bei der Stahlproduktion hohen Temperaturen oft ein Problem für die Elektronik der Speicherchips. Ein großer Vorteil der RFID-Chips ist neben der Fähigkeit Daten zu speichern, die Möglichkeit gespeicherte Informationen über Nahfunktechnik auslesen zu können, siehe Abb. 2.3 und Abb. 2.4.

Je nach Ausführung ergeben sich bei RFID-Chips spezifische Vor- bzw. Nachteile hinsichtlich der Verwendungsmöglichkeiten. Da die Informationen ausschließlich als Daten auf einem Speicherchip vorhanden sind, benötigt man zwingend ein entsprechendes Lesegerät, welches die Information anzeigen und/oder verarbeiten kann. Dies erhöht Kosten und Aufwand in Produktion, Fertigung und Montage. Zudem gehen bei einem Defekt der Chips durch beispielsweise technische Alterung oder mechanische Einwirkungen alle Informationen verloren. Eine Zuordnung zu den gespeicherten Daten stellt sich dann als schwierig dar. Sind die RFID-Chips in Bauteilen eingearbeitet, bieten sie eine erhöhte Sicherheit gegen Manipulationen, da sie quasi nicht zu entfernen sind.



Abb. 2.3 RFID-Chip mit Handheld-Scanner

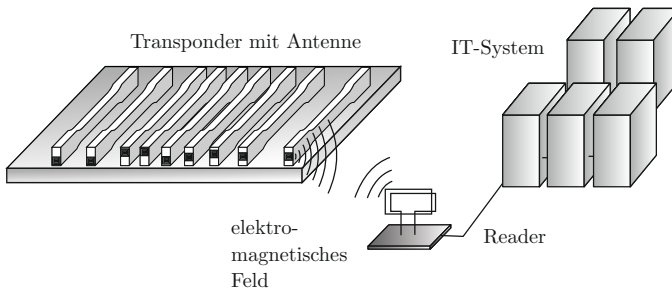


Abb. 2.4 Schematischer Aufbau der RFID-Technik

Der wesentliche Nachteil von RFID-Chips im Einsatz als Kennzeichnungs- und Rückverfolgbarkeitsmethode im Stahlbau ist die abschirmende Wirkung der metallischen Umgebung, welche eine sichere Datenübertragung verhindert. Eine zuverlässige und störungsfreie Kommunikation zwischen Sender und Empfänger ist besonders bei vielen gleichzeitig zu scannenden oder übereinander liegenden Teilen, etwa auf einem LKW oder einer Palette, derzeit noch schwer umzusetzen.

Problematisch ist bei allen Methoden die insgesamt fehlende Dauerhaftigkeit. Besonders bei Markierungen, die dauerhaft im Bauteil verbleiben sollen und äußeren Einflüssen ausgesetzt sind, kann bei den hier beschriebenen Methoden derzeit noch keine zufriedenstellende Lösung erreicht werden. In diesen Fällen sollten dauerhafte Kennzeichnungsmethoden eingesetzt werden, welche sich im



Abb. 2.5 Beispiel eines mobilen Kennzeichnungsgeräts für Hartes Stempeln der Firma HILTI

Bauwesen auf vier Methoden einschränken lassen. Diese sind Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln.

2.2.2 Dauerhafte Kennzeichnungen

Hartes Stempeln

Das Harte Stempeln bezeichnet einen Prozess, bei dem ein zuvor angefertigter Stempel mit hoher kinetischer Energie in das zu markierende Material gedrückt wird. Die Markierung entsteht hier durch plastische Verformung und Verdrängung des Grundmaterials. Der Stempel setzt sich häufig aus unterschiedlichen Buchstaben oder Zahlen zusammen, siehe Abb. 2.5, weist im Grunde aber keine Beschränkungen hinsichtlich der Geometrie auf. Da jeder Stempel gesondert angefertigt werden muss, ist der Aufwand für einmalig zu verwendende Kennzeichnungsgeometrien sehr hoch, weshalb mit einer harten Stempelung in der Regel standardisierte Zeichen markiert werden. Darüber hinaus können mit harten Stempeln keine Linien zum Anreißen von Bauteilen oder Markieren erstellt werden.

Maschinen für harte Stempelungen können sowohl mobil als auch stationär ausgeführt werden. Mobile Geräte, Abb. 2.5, bieten eine höhere Flexibilität, lassen sich aber nicht automatisch in Produktionsstraßen integrieren.

Bei stationären Maschinen lassen sich die Markierungen computergestützt und somit automatisiert vornehmen, siehe Abb. 2.6. Die Markierung erfolgt hierbei auf Basis von CNC-Daten, welche zuvor für entsprechende Bauteile festgelegt wurden. Die Wahl der Markiergeometrie ist hier in der Regel auf Buchstaben- und Zahlenkombinationen begrenzt, was die Handhabung einschränkt.



Abb. 2.6 Vollautomatische Signiermaschine (links) mit Detailansicht des Prägerades (rechts) der Firma Kaltenbach [© Kaltenbach GmbH + Co. KG]

Das Markierungsergebnis hängt im Wesentlichen vom Arbeitsdruck, sprich der Eindrückenergie, der Geometrie des Stempels und der Handhabbarkeit der entsprechenden Maschine ab. Während bei stationären Maschinen alle Parameter sehr konstant und reproduzierbar eingestellt werden können, kann das Markierungsergebnis bei mobilen Einheiten stärker variieren, siehe Abb. 2.7. In der oberen Markierung durch eine stationäre Maschine ist gut zu erkennen, dass das Markierungsergebnis über alle Ziffern nahezu identisch ist. Die untere Markierung, welche mit einem mobilen Markiergerät händisch hergestellt wurde, zeigt dagegen eine ungleichmäßige Verteilung. Die Markierung auf dem Bild ist durch einen Markiertiefengradienten gekennzeichnet. Die Tiefe der Stempelmarkierung nimmt von der ersten Ziffer (links) bis zur letzten (rechts) stetig zu. Zudem wird die Markierung auch von unten nach oben immer tiefer.

Die Unterschiede der in Abb. 2.7 dargestellten Markierungsergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die stationäre (obere) Markierung mit einzelnen Eindrückungen für jedes Zeichen, die mobile (untere) Markierung hingegen mit einem zusammenhängenden Stempelsatz in einem Arbeitsgang erstellt wurde, vgl. Abb. 2.7. Infolge der relativ langen Markierung in einem Schritt wirken sich leichte Auflagefehler bzw. eine nicht perfekt lotrechte Ausrichtung der Markierpistole stärker auf das Ergebnis aus, siehe Abb. 2.8. Bereits ein sehr kleiner Winkelfehler von ca. 3 Grad kann zu deutlich abweichenden Ergebnissen führen.

Hinzu kommt, dass bei einer stationären Maschine der Stempeldruck auf das Grundmaterial klar definiert ist, während die mobilen Geräte oft mit Druckluft oder Treibladungen angetrieben werden. Dabei ist nicht nur der Arbeitsdruck



Abb. 2.7 Vergleich der Stempelergebnisse einer stationären (oben) und mobilen (unten) Einheit

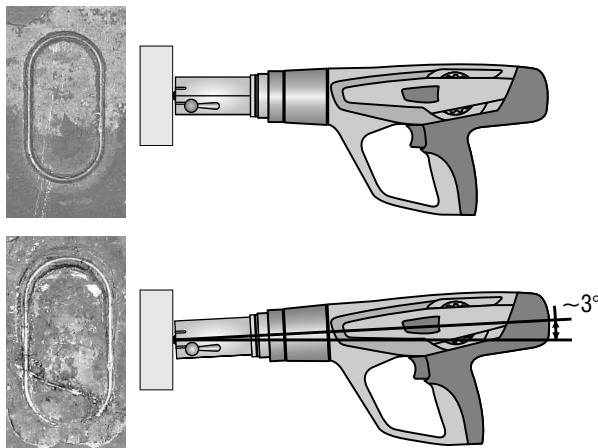


Abb. 2.8 Auswirkungen von Auflagefehlern mobiler Stempelpistolen auf das Markierergebnis

deutlich variabler als bei stationären hydraulisch oder elektrisch betriebenen Maschinen, sondern auch die Gegenhalterkraft des Bedieners. In Abhängigkeit des Auflagedrucks, erzeugt durch den Bediener, geht mehr oder weniger Energie im Rückstoß der Maschine verloren, wodurch die Markierungen ungleichmäßiger werden können. Zudem ist bei mobilen Markierungen die Auflagefläche des Werkstücks entscheidend. Liegt das Bauteil beispielsweise auf einem federnden

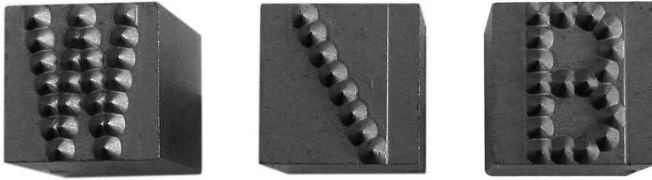


Abb. 2.9 Geometrisch angepasste Markierstempel der Firma Kaltenbach
[© Kaltenbach GmbH + Co. KG]

Untergrund, geht entsprechend Energie verloren, welche nicht als Markierung ins Bauteil einfließen kann.

In der Praxis ist daher davon auszugehen, dass bei mobilen Markiergeräten in der Regel weniger gleichmäßige Ergebnisse erzeugt werden können als mit stationären Maschinen.

Die Markierung selbst entspricht dem Negativ der Form des Stempels, da der Stempel direkt in das Grundmaterial eingedrückt wird. Mit der Form und Ausprägung des Stempels kann somit großer Einfluss auf die Geometrie der Kerbe genommen werden. In der Regel werden beim Harten Stempeln spitz zulaufende Formen benutzt, so dass die zur Markierung benötigte Energie beim Eindringen in das Grundmaterial reduziert wird und damit mit den erwähnten mobilen Geräten mehrere Zeichen gleichzeitig geprägt werden können. Die infolge der Markierung hinterlassene Kerbe hat je nach Geometrie einen mehr oder weniger starken Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit des gekennzeichneten Bauteils. Maschinenhersteller sind daher bestrebt, Stempel zu entwickeln, welche eine für die Ermüdungsfestigkeit günstigere Geometrie aufweisen, siehe z. B. Abb. 2.9. Durch konvexe Kanten des Stempels bzw. konkave Kanten der Markierung soll der Kräftefluss optimiert werden, was den Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit herabsetzen soll. Die infolge der Ausrundung erhöhte benötigte Energie soll hierbei durch eine Auflösung der Stempel in einzelne Markierpunkte ausgeglichen werden.

Fräsen

Bei der Fräsmarkierung, auch bekannt als Scribing oder Contour-Marking, wird ein entsprechend entwickelter Hartmetallfräskopf mit hoher Umdrehungsgeschwindigkeit in das Grundmaterial eingebracht und dann mit definierter Eindringtiefe

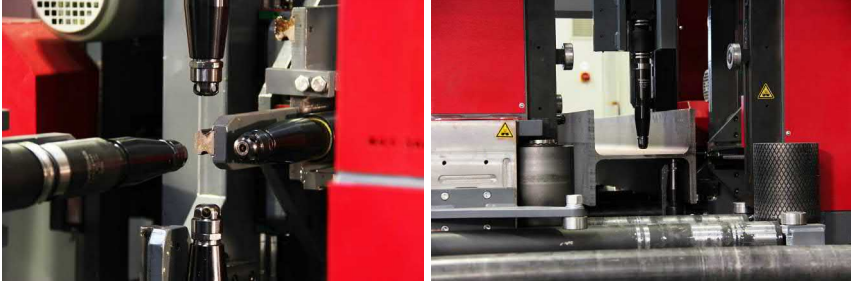


Abb. 2.10 Beispielhafte Darstellung einer Fräsmaschine der Firma Voortmann zur Markierung von Bauteilen [6]

entlang der geplanten Markierspur geführt. Die Markierung erfolgt somit durch Materialabtrag. Mithilfe der Fräsmarkierung können beliebige Zeichen und Formen hergestellt werden. Dieser Markiertyp eignet sich somit sowohl zum Anreißen von Bauteilen als auch zum Markieren von Informationen in Form von Zeichen, Buchstaben oder Zahlen. Das Fräsverfahren lässt sich damit sehr flexibel einsetzen, zumal die entsprechenden Maschinen in der Regel in Produktionsstraßen integriert sind. Zusätzlich kann mithilfe der automatischen Kennzeichnung das sonst zeitaufwändige Anreißen von Bauteilen oder das Aufbringen von Positionsinformationen durch feine Fräslinien übernommen werden. Die Maschinenhersteller liefern hierfür mittlerweile Fräsmaschinen, die Bauteile simultan von bis zu vier Seiten bearbeiten können, siehe Abb. 2.10. Die Flexibilität und Effizienz in der Produktion und Fertigung kann dadurch stark erhöht werden.

Die Geometrie der Fräsmarkierung ist zum einen von der Geometrie des Fräskopfes, zum anderen von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Werkzeuges sowie der Schärfe der Schneidkanten abhängig. Die grundsätzliche Form der Markierung wird von der Form des Fräskopfes vorgegeben. Für die Geometrie von Fräsköpfen existiert eine Vielzahl an Ausführungsmöglichkeiten. Hierzu zählen neben verschiedenen Fräskopfgrößen auch unterschiedliche Formen, wie Rundkopffräser, Schaftfräser oder speziell auf die Bedürfnisse der Markierung angepasste Fräsköpfe, welche sowohl tiefe als auch sehr feine Markierungen zulassen. Diese sind in der Regel mit einer konisch zulaufenden Schneidspitze versehen, welche der Markiertiefe entsprechend in das Grundmaterial eingebracht wird, siehe Abb. 2.11.

Einen weiteren Einfluss stellen die Schneidkanten des entsprechenden Fräsbohrers dar. Je nach Einsatzdauer und Material kann sich die Qualität der Kennzeich-

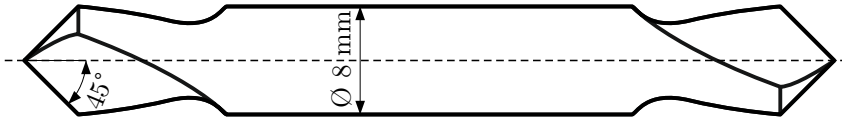


Abb. 2.11 Exemplarische Darstellung eines Fräswerkzeugs

nung infolge von Abnutzungserscheinungen verändern. Das Material wird dann nicht mehr sauber aus dem Grundwerkstoff geschnitten, wodurch unsaubere Kanten und Markierungen entstehen. Als problematisch kann sich bei der Fräsmarkierung die Einstellung einer gleichbleibend tiefen Markierung herausstellen, da die Fräsmaschinen in der Regel keinen automatischen Höhenausgleich bieten. Infolgedessen wirken sich Walz-, Bauteil- und Lagetoleranzen der zu markierenden Teile direkt auf die Markiertiefe aus. Die Programmierung der Maschine stellt sich in den meisten Fällen auf den ersten zu markierenden Punkt ein. Der Vorschub des Fräskopfes erfolgt dann ausschließlich in Markierrichtung.

Plasamarkieren

Das Plasamarkieren ist eine Form des Plasmaschneidens, welches häufig in Stahlbaubetrieben zum Trennen von Stahl eingesetzt wird. Beide Verfahren sind thermische Schneidprozesse, welche durch einen mithilfe einer Düse gerichteten Lichtbogen erfolgen. Der elektrisch erzeugte Lichtbogen hat eine Temperatur von bis zu 30.000°C und wird zwischen dem Werkstück und einer nichtabschmelzenden Elektrode erzeugt. Infolge der hohen Temperatur und dem schnellen gerichteten Lichtbogenstrahl kann der zu markierende oder trennende Werkstoff aufgeschmolzen werden. Dadurch entsteht eine saubere Markierung bzw. ein sauberer Schnitt durch das Material. Die hohe Geschwindigkeit des Lichtbogenstrahls wird durch eine verengte Düse an der Spitze des Werkzeugs erzeugt. Dadurch wird der Strahl sehr schmal und sorgt für einen schnellen und präzisen Schnitt. Während des Plasmaschneidvorgangs wird aufgeschmolzenes Material aus der Schnittfuge herausgetrieben, was wiederum eine saubere Schnittfuge fördert, siehe Abb. 2.12.

Beim Plasamarkieren wird im Vergleich zum Plasmaschneiden mit einer deutlich geringeren Stromstärke gearbeitet, da nur ein oberflächennaher Anschnitt als Markierung erzeugt werden soll. Während beim Plasmaschneiden Stromstärken bis 600 Ampere üblich sind, liegt die Stromstärke beim Markieren bei ca. 5

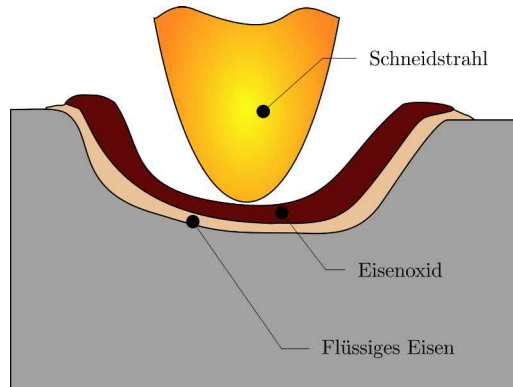


Abb. 2.12 Vorgänge in der Metallschmelze beim Brennschneiden in Anlehnung an [7]

bis 20 Ampere. Ein Vorteil der Ähnlichkeit beider Verfahren Plasmaschneiden und Plasmamarkieren ist, dass unter gewissen Vorraussetzungen für beide Verfahren die gleichen Maschinen genutzt werden können. Dies reduziert Kosten und Aufwand in bereits bestehenden Fertigungsstraßen. Die Markiertiefe lässt sich beim Plasmamarkieren vergleichsweise genau über zwei Markierparameter einstellen. Neben weiteren Maschinenparametern sind besonders zwei Faktoren für die Markierung entscheidend: die Markierstromstärke und die Markiergeschwindigkeit. Bei erhöhter Stromstärke wird die Markierung bei gleichbleibender Markiergeschwindigkeit tiefer. Erhöht man die Markiergeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der das Werkzeug in Markierrichtung bewegt wird, so wird bei gleicher Stromstärke die Markierung flacher. Grundsätzlich wird eine Markierung tiefer, je länger der Plasmastrahl an einer Stelle verweilt. Im Gegensatz zum Fräsen ließe sich so beim Plasmamarkieren eine in Abhängigkeit von der Maschinengenauigkeit relativ konstante Markierspur erreichen. In der Praxis unterliegen die Markierungsergebnisse allerdings maschinenbedingten Streuungen, da beispielsweise die Markiergeschwindigkeit nicht immer exakt gleichbleibend ist. Aus diesem Grund kann es besonders bei Kurven oder Richtungsänderungen in Markierungen zu gewissen Unregelmäßigkeiten in der Markiergeschwindigkeit und somit auch im entsprechenden Ergebnis kommen, siehe Abb. 2.13.

Hinzu kommt bei Plasmamarkierungen die Tatsache, dass an allen Ansatz- sowie Umkehrpunkten der Markierspur tiefere Einschnitte erfolgen. Dies liegt ebenfalls an der geringfügig größeren Verweildauer des Plasmabrenners beim Ansetzen.

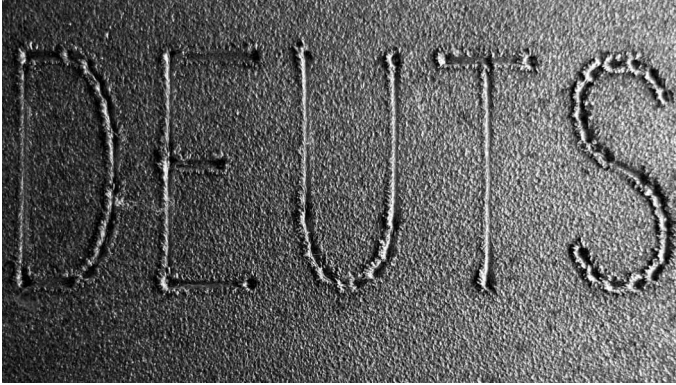
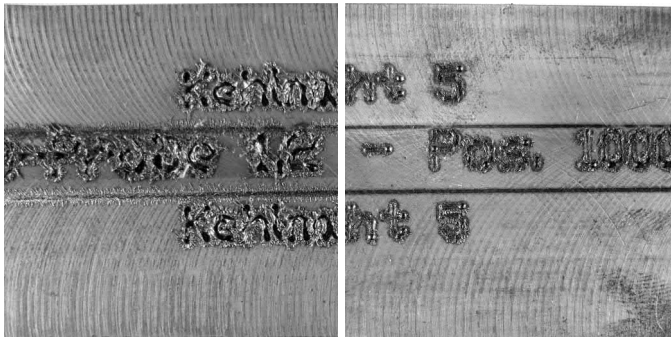


Abb. 2.13 Exemplarische Darstellung einer Plasmamarkierspur mit 17 A



15 Ampere

5 Ampere

Abb. 2.14 Direkter Vergleich der Plasmamarkierungsergebnisse infolge einer Markierstromstärke von 15 A (links) und 5 A (rechts)

Aufgrund der oben erwähnten Einschränkungen sind insbesondere filigrane oder kleine Markierungen eine Herausforderung für Plasmamarkierungen, siehe Abb. 2.14. Zum einen wird hier der Unterschied zwischen zwei Stromstärken ersichtlich, zum anderen ist die Markierung im Vergleich zu der Markierung in Abb. 2.13 deutlich unsauberer. Dies liegt an den im Vergleich deutlich kleineren zu markierenden Schriftzeichen.

Darüber hinaus ist in Abb. 2.14 deutlich zu erkennen, dass sich das aufgeschmolzene Material am Rand der Markierspur ablagert. Je nach Menge des aufgeschmolzenen Materials und somit der Tiefe der Markierspur handelt es sich hier um mehr (Abb. 2.14) oder weniger (Abb. 2.13) Material.

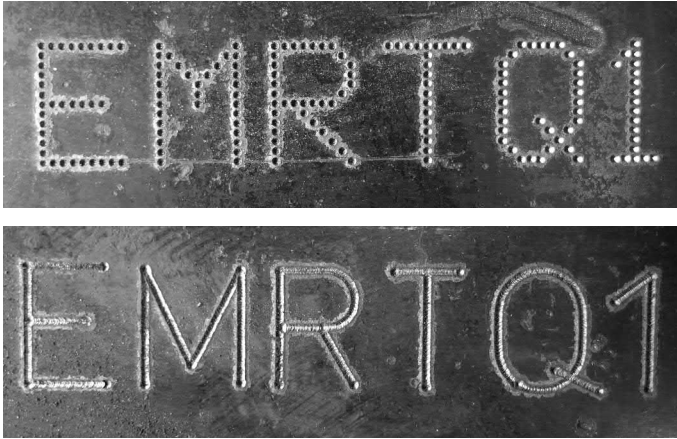


Abb. 2.15 Vergleichende Darstellung unterschiedlicher Nadelmarkierungen

Nadeln

Die Nadelmarkierung beschreibt einen Prozess, bei dem eine Markierung mithilfe einer pneumatisch, elektrisch oder magnetisch angetriebenen oszillierenden Nadel aus Hartmetall erzeugt wird. Die Nadel wird hierbei Punkt für Punkt in das Material gedrückt und erzeugt so ein entsprechendes Markiermuster, siehe Abb. 2.15.

In Abhängigkeit der Abstände der einzelnen Markierpunkte ergibt sich entweder ein klar abgegrenztes Punktmuster oder eine zusammenhängende Markierspur.

Nadelmarkierungen werden häufig seitens der Stahlhersteller zur Kennzeichnung von Stahlblechen verwendet. In der Regel wird beispielsweise nach der Produktion die Stahlgüte auf die Bleche markiert.

Die Markiergeometrie ist wie beim Harten Stempeln abhängig von der Geometrie der Nadelspitze und der Eindrückenergie. Die Nadelspitze hat in der Regel eine konisch verlaufende Form mit einem mehr oder weniger großen Radius an der Nadelspitze, siehe Abb. 2.16.

Bei der Verwendung besonders ausgerundeter Nadelspitzen spricht man beim Nadelprozess vom „low stress needling“, da sich der Effekt der Markierung auf den Spannungsfluss und die Ermüdungsfestigkeit verringern soll. Da bei Nadel-

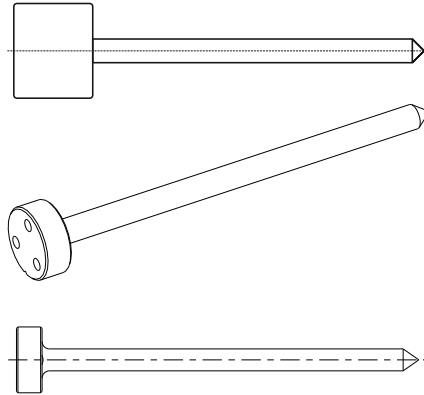


Abb. 2.16 Exemplarische Darstellung zweier Markiernadeln



Abb. 2.17 Beispielhafte Darstellung eines Nadelmarkiergerätes (links) mit Nadelspitze (rechts)

markierungen immer nur einzelne Punkte markiert werden, ist der Kraftaufwand im Gegensatz zum Harten Stempeln deutlich geringer.

Nadelmarkiermaschinen sind sowohl stationär als auch mobil verfügbar. Als stationäre Maschinen sind sie in der Regel in Produktionsstraßen integriert. Mobile Maschinen, siehe auch Abb. 2.17, lassen sich flexibel auf nahezu allen Bauteilen einsetzen.

Aufgrund des geringeren benötigten Kraftaufwands lassen sich auch mobile Nadelmarkierungen mit reproduzierbar gleichen Eigenschaften erstellen. Der Rückstoß infolge der Nadelmarkierung ist in der Regel so gering, dass sich die Maschinen mit Magneten an Stahlbauteilen befestigen lassen.

2.3 Oberflächenkerben infolge unplanmäßiger Ungängen

Neben den erwähnten planmäßigen Kennzeichnungen zur Identifizier- und Rückverfolgbarkeit können insbesondere im Stahlbau auch unplanmäßige Ungängen in Form von Oberflächenkerben auftreten, welche zwangsläufig in der Produktion und Fertigung eingebracht werden. Diese entstehen während der Bearbeitung und des Transports der Stahlbleche oder Profile, wenn die Oberflächen der Bauteile gegeneinander verschoben oder mit Greifarmen an Kranbahnen transportiert werden. Die so eingebrachten unplanmäßigen Ungängen weisen in der Regel eine hohe Kerbschärfe auf, sind allerdings im Vergleich zu planmäßigen Kennzeichnungen vergleichsweise flach. Gemäß DIN EN 1993-1-9 [3] sind bei Auftreten von Oberflächen- und Walzfehlern sowie Randkerben diese durch Schleifen zu beseitigen. Zudem ist an diesen Stellen ein nahtloser Übergang herzustellen. Darüber hinaus müssen Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) parallel zu den Spannungen verlaufen [3]. Unabhängig von diesen Regelungen dürfen gemäß DIN EN 1090-2 [1] Kennzeichnungen nur aufgebracht werden, wenn dadurch keine Schädigung entsteht. Diese Anforderungen scheinen zunächst plausibel, da prinzipiell jegliche Fehlstelle zu einer Spannungskonzentration führt, welche in ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen Ausgang für einen Ermüdungsriß darstellen kann. Das Verhalten derartiger Fehlstellen wurde jedoch bisher ebenso wenig im Detail untersucht wie das Verhalten infolge von dauerhaften Kennzeichnungen, weshalb die aktuellen Anforderungen gerechtfertigt werden können.

Dennoch entsteht mit dieser aktuellen Normungslage den produzierenden Stahlbauunternehmen ein erheblicher Mehraufwand, da faktisch alle Fehlstellen, Riefen, Kratzer und Kerben aus dem Grundmaterial geschliffen werden müssen. Somit stellt sich die Frage, wie hoch eine Schädigung infolge unplanmäßiger und planmäßiger Kerben ausfällt und inwieweit die derzeit gültigen Regelungen angepasst werden können.

2.4 Ermüdungsfestigkeit gekennzeichnete Bauteile

2.4.1 Allgemeines

Unter dem Begriff der Ermüdung versteht man den Schädigungsprozess eines Bauteils oder Bauwerks unter zeitlich veränderlicher und häufig wiederkehrender Beanspruchung. Das Ermüdungsversagen erfolgt durch Entstehung kleiner

technischer Anrisse mit kontinuierlichem Risswachstum bis zu einer instabilen Risswachstumsphase, welche vergleichsweise schnell zum Restbruch führt.

Ein Ermüdungsversagen kann bereits bei Belastungen deutlich unterhalb der statischen Beanspruchbarkeit nach einer unbestimmten Zahl an ertragbaren Lastwechseln erfolgen. Für dynamisch beanspruchte Konstruktionen ist daher immer auch ein Ermüdungsnachweis erforderlich. Zusätzlich werden bei dynamisch beanspruchten Bauwerken, wie beispielsweise Brücken, Inspektionsintervalle angeordnet, bei denen die relevanten Bauteile auf Risse und Schäden überprüft werden.

2.4.2 Rissentstehung und Risswachstum

Die Rissentstehung bzw. das Risswachstum haben einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer eines Bauwerks. Die verschiedenen Rissphasen während einer Ermüdungsbeanspruchung lassen sich in drei Abschnitte einteilen, siehe Abb. 2.18.

Phase I ist von der Rissinitiiierung gekennzeichnet. Die Rissinitiiierung erfolgt bei zyklischer Beanspruchung durch das Entstehen von Mikrorissen, die sich im Laufe der Beanspruchungszyklen zu einem sogenannten technischen Anriss zusammenschließen. Die Länge eines technischen Anrisses entspricht in der Regel der Fehlergröße, welche mit zerstörungsfreien Prüfverfahren detektierbar ist [8]. Der technische Anriss erfolgt in der Regel an Stellen eines Bauteils, an welchen

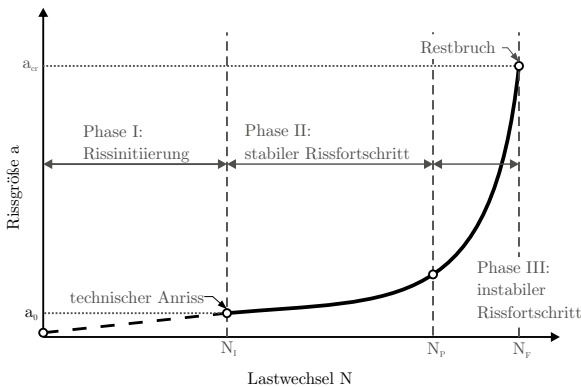


Abb. 2.18 Phasen des Risswachstums

Kerben, Querschnittsübergänge oder Materialfehler vorliegen. Besonders bei markierten Bauteilen ist somit die Art und Ausprägung der eingebrachten Kerbe von entscheidender Bedeutung. Die bis zu einem technischen Anriss erreichte Lastwechselzahl wird als N_I („initiation“) bezeichnet und ist stark abhängig von der Größe und Art der Beanspruchung, des vorliegenden Materials sowie Art und Schwere der Fehlstellen. Sobald ein technischer Anriss vorliegt, wird der weitere stabile Rissfortschritt als Phase II bezeichnet.

Infolge des bereits vorhandenen Anrisses bilden sich bei weiteren Beanspruchungen örtlich im Bereich des Risses Spannungskonzentrationen, siehe auch Abb. 2.19, welche infolge der Ermüdungsbeanspruchung zu Wechselplastizierungen und somit zu weiterem Risswachstum führen.

In Abhängigkeit von der Belastung geht das stabile in ein instabiles Risswachstum (Phase III) bis zum Versagen des Bauteils über. Das instabile Risswachstum erstreckt sich in der Regel über einen deutlich kürzeren Zeitraum als das stabile Risswachstum. Ein Versagen durch Gewaltbruch der restlichen Querschnittsfläche tritt bei einer kritischen Rissgröße a_{cr} ein. Die Lastwechselzahl, welche zum Übergang von einem stabilen zu instabilem Risswachstum führt, wird als N_P („propagation“) bezeichnet. Die Lastwechselzahl bis zum Restbruch wird als N_F („failure“) bezeichnet. Da die ertragbaren Lastwechsel in Phase III bis zum Bruch relativ klein sind, kann die Lebensdauer eines Bauteils über die Rissentstehung und das Risswachstum definiert werden.

Die Lebensdauer N_F kann somit definiert werden als Summe aus ertragbaren Lastwechselzahlen N_I und N_P . Größe und Verhältnis der beiden Lastwechsel-

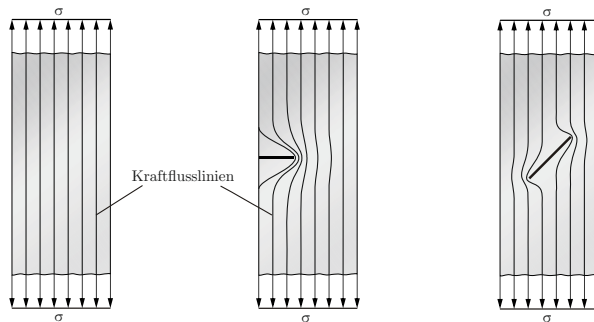


Abb. 2.19 Störung des Kräfteflusses durch Kerben, Risse oder Fehlstellen in Anlehnung an [9]

zahlen zueinander hängen dabei von unterschiedlichen Faktoren ab. Bei quasi kerbfreien Proben oder Bauteilen erstreckt sich die Rissinitiierungsphase über einen vergleichsweise großen Zeitraum. Bei bereits gekerbten Proben kann in Abhängigkeit von der Kerbgeometrie bereits von einem technischen Anriss ausgegangen werden, wodurch sich das Ermüdungsverhalten auf die Phase der stabilen Rissausbreitung beschränkt. Für ungekerbte Proben, welche als quasi eigenspannungslos betrachtet werden können, kann mit zunehmender Festigkeit des Grundwerkstoffs aufgrund der ausgeprägten Rissinitiierungsphase ein quasi linearer Anstieg der Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden, siehe Abb. 2.20. Bei zunehmender Kerbwirkung im betrachteten Bauteil nimmt der Einfluss der Zugfestigkeit des Werkstoffs auf die Ermüdungsfestigkeit ab.

Im Fall der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Markiermethoden kann in Abhängigkeit der Geometrie der infolge einer Kennzeichnung eingebrachten Kerbe nicht eindeutig definiert werden, ob bereits eine Rissinitiierung vorliegt. Bei harten Stempelungen oder Fräsmarkierungen kann möglicherweise von einem Anriss ausgegangen werden, bei Plasma- und Nadelmarkierungen ist eine Definition nicht ganz eindeutig zu treffen. Wie groß der Einfluss der Zugfestigkeit bzw. der Streckgrenze des Materials auf die Ermüdungsfestigkeit von dauerhaft markierten Stahlbauteilen ist, gilt es somit zu untersuchen.

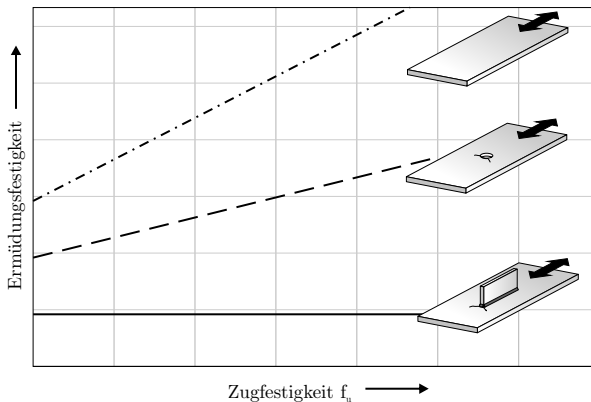


Abb. 2.20 Einfluss der Zugfestigkeit auf die Ermüdungsfestigkeit bei unterschiedlicher Kerbwirkung in Anlehnung an [10]

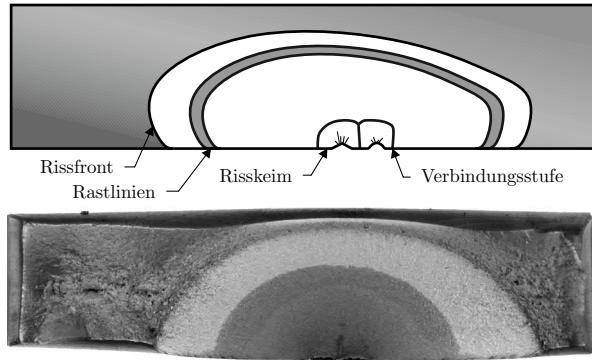


Abb. 2.21 Darstellung einer typischen Ermüdungsbruchfläche als Schema (oben) und Bruchbildfoto (unten)

Das Rissbild eines Ermüdungsbruchs ist gekennzeichnet durch eine vergleichsweise glatte und feinkörnige Ermüdungsbruchfläche sowie eine relativ grobkörnige Restbruch- oder Gewaltbruchfläche, siehe Abb. 2.21.

Ermüdungsrisse beginnen mit einem Risskeim, dem technischen Anriss, von einer Fehlstelle und breiten sich von da annähernd halbelliptisch aus bis die verbliebene Querschnittsfläche so klein ist, dass es zum Versagen durch einen Restbruch kommt.

2.4.3 Ermüdungsversuch

Ermüdungsbeanspruchte Bauteile unterliegen meist sehr komplexen und nicht eindeutig bestimmbar Belastungsstufen. Um eine vergleichbare Aussage über die Ermüdungsfestigkeit bestimmter Bauteile treffen zu können, ist daher ein einheitlich abstrahiertes Modell notwendig, welches diese Aussagen liefert. Diese Abstraktion leistet der Ermüdungsversuch. Beim Ermüdungs- oder Dauerschwingversuch werden Prüfkörper mit einer schwingenden Belastung beaufschlagt. Die Belastung kann im Ermüdungsversuch zugschwellend, druckschwellend oder wechselnd erfolgen, siehe Abb. 2.22. Das Verhältnis zwischen Ober- und Unterspannung wird in diesem Zusammenhang als R bezeichnet.

Die Dauerfestigkeit wird in der Regel nach dem Wöhler-Verfahren ermittelt. Hierbei werden ca. 10 Versuchskörper, welche hinsichtlich Werkstoff, Bearbeitungszustand und Beschaffenheit identische Eigenschaften besitzen, Schwingbeanspru-

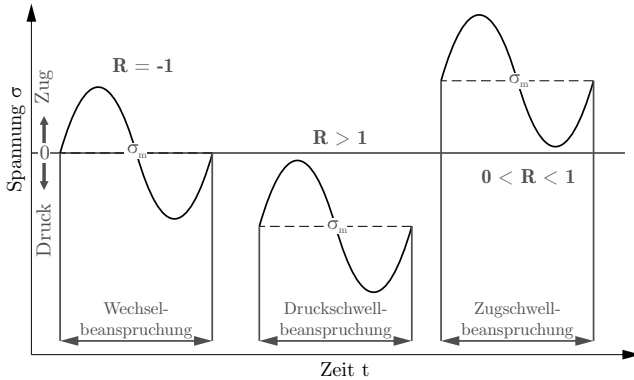


Abb. 2.22 Beanspruchungsbereiche im Dauerschwingversuch

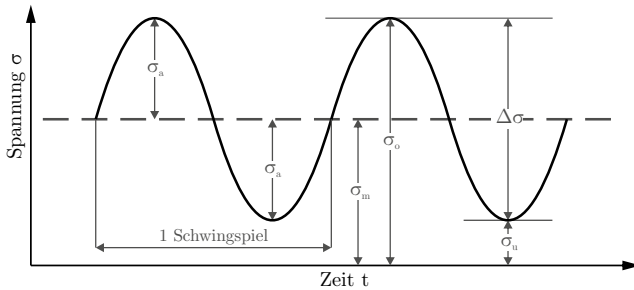
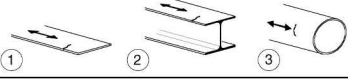











Abb. 2.23 Schema der Belastung eines Dauerschwingversuches

chungen mit wechselnden Lasthorizonten unterzogen. Die für die jeweilige Probe eingestellte Beanspruchung wird dabei während der Prüfung nicht verändert. Bei diesem Versuch handelt es sich somit um einen Einstufen-Dauerschwingversuch oder ein Einstufenkollektiv, siehe Abb. 2.23.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche können in einem Wöhlerdiagramm aufgetragen und bewertet werden. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit wird bei einer Schwingspielzahl von $2 \cdot 10^6$ ermittelt. Für ausgewählte stahlbautypische Kerbdetails sind die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit z. B. im Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 [3] zusammengefasst, siehe Abb. 2.24.

Tabelle 8.1 — Ungeschweißte Bauteile und Anschlüsse mit mechanischen Verbindungsmitteln

Kerbfall	Konstruktionsdetail	Beschreibung	Anforderungen
160	<p>ANMERKUNG Der Kerbfall 160 ist der höchst mögliche; kein Kerbfall kann bei irgendeiner Anzahl an Spannungsschwingspielen eine höhere Ermüdungsfestigkeit erreichen.</p> 	<p>1)  Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse;  2)  Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten;  3) Nahtlose rechteckige oder runde Hohlprofile.</p>	<p>Kerbfälle 1) bis 3): Scharfe Kanten, Oberflächen- und Walzfehler sind durch Schleifen zu beseitigen und ein nahtloser Übergang herzustellen.</p>
140		<p>Gescherte oder brenngeschnittene Bleche. 4) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. 5) Maschinell brenngeschnittener Werkstoff mit seitlichen und regelmäßigen Brennriefen oder von Hand brenngeschnittener Werkstoff mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Maschinell brenngeschnittener Werkstoff der Schnittqualität entsprechend EN 1090.</p>	<p>4) Alle sichtbaren Randkerben sind zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen. Riefen infolge mechanischer Bearbeitung (z. B. Schleifen) müssen parallel zu den Spannungen verlaufen. Kerbfälle 4) und 5): Einspringende Ecken sind durch Schleifen (Neigung $\leq \frac{1}{4}$) zu bearbeiten oder durch einen entsprechenden Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen; keine Ausbesserungen durch Verfüllen mit Schweißgut.</p>
125			
100 $m = 5$		<p>6) und 7)  Gewalzte oder gepresste Erzeugnisse entsprechend der Kerbfälle 1), 2), 3) </p>	<p>Kerbfälle 6) und 7): Δr berechnet nach: $r = \frac{F \cdot S(t)}{I \cdot t}$</p>

Für Kerbfall 1–5 ist bei Einsatz von wetterfestem Stahl der nächsttiefere Kerbfall zu verwenden.

Abb. 2.24 Auszug aus dem Kerbfalkatalog der DIN EN 1993-1-9 [3]

2.5 Oberflächenkerben: Stand der Technik

2.5.1 Stand der Normung

Berücksichtigung von Kennzeichnungsmethoden in Ausführung und Bemessung

Die Ausführung von Stahltragwerken ist in DIN EN 1090-2 [1] geregelt. Diese gibt für die Identifizierbarkeit und Kennzeichnung von Bauteilen strengere Regeln vor als die seinerzeit gültige DIN 18800-7 [2], welche lediglich eine eindeutige Identifizierbarkeit aller Teile von Stahlkonstruktionen während sämtlicher Fertigungsabschnitte forderte. Wie diese Identifizierbarkeit gewährleistet werden sollte oder musste, schrieb DIN 18800-7 nicht vor. DIN EN 1090-2 fordert hingegen explizit neben einer eindeutigen Identifizierbarkeit und Rückverfolgbarkeit während aller Produktions- und Fertigungsprozesse, wie in DIN 18800-7, zusätzlich für Bauwerke der Ausführungsklassen EXC3 und EXC4 die eindeutige Zuordnung von Prüfbescheinigungen zu den ausgeführten Bauteilen und deren Komponenten. Eine Identifizierung der Bauteile kann nach DIN EN 1090-2 neben weiteren Maßnahmen auch durch dauerhafte Kennzeichnungen erfolgen, insbesondere dann, wenn die Identifizierung nicht durch die Form des Bauteils selbst oder durch

eine Loskennzeichnung sichergestellt werden kann. Die Aufbringung dauerhafter Kennzeichen ist allerdings nur erlaubt, wenn durch die Markierung keine Schäden verursacht werden. Die in DIN EN 1090-2 beschriebenen dauerhaften Kennzeichnungsmethoden können im Wesentlichen den vier Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln zugeordnet werden.

Diese dauerhaften Markiermethoden sind nach DIN EN 1090-2 allerdings nur bedingt erlaubt. So ist der Einsatz lediglich zulässig für Stahlsorten bis einschließlich S355, nicht zulässig bei nichtrostenden Stählen und nur in vorher festgelegten Bereichen, in denen kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erwarten ist. Ist der Einsatz dieser Markiermethoden nicht zulässig, muss geprüft werden, ob Weichprägungen eingesetzt werden dürfen. Meißelkerben sind nicht zugelassen.

In den Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe, DIN EN 1011-1 [11], wird des Weiteren gefordert, dass harte Stempelungen generell, aber insbesondere in hochbeanspruchten oder korrosionsgefährdeten Bereichen vermieden werden sollten.

Ein weiterer Vermerk zu dauerhaften Kennzeichnungen findet sich indirekt in den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4, Stahlbau, Stahlverbundbau (ZTV-ING Teil 4) [12], in welchen für die Wahl der Werkstoffe für tragende Bauteile von Brücken die technischen Lieferbedingungen der Deutschen Bahn, Deutsche Bahn Standard (DBS) 918 002-02 [13] vorgeschrieben werden. DBS 918 002-02 fordert wiederum für Flacherzeugnisse und Form- und Stabstahl mit einem Gewicht von mehr als 15 kg/m eine Kennzeichnung mittels Schlagstempelung oder Hartstempelung. Eine alternative Markierung ist nur nach Zustimmung des Bestellers zulässig. Darüber hinaus verbietet ZTV-ING Teil 4 konkret oberflächenverändernde Markierungen wie z. B. Schlagmarkierungen, Fräsungen, Nadelungen oder Plasmamarkierungen in ermüdungsgefährdeten Bereichen.

Hinsichtlich des Einsatzes von harten Markierverfahren widersprechen sich DIN EN 1090-2 und DBS 918 002-02 faktisch, was die Frage nach der Ausführbarkeit aufwirft.

Eine Einordnung markierter Bauteile in den europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [3] ist für gekennzeichnete Bauteile generell nicht möglich. Die höchste Kerbfallklasse nach DIN EN 1993-1-9 ist 160 und gilt für Bleche und Flachstähle mit gewalzten Kanten. Für eine Einordnung in Kerbfallklasse 160

sind scharfe Kanten sowie Oberflächen- und Walzfehler durch Schleifen zu beseitigen. Zusätzlich ist an diesen Stellen ein nahtloser Übergang herzustellen. Die Kerbfallklassen 140 und 125 gelten für maschinell bzw. von Hand brenngeschnittene Bauteile mit nachträglicher mechanischer Bearbeitung. Als Anforderungen für diese beiden Kerbfallklassen sind alle sichtbaren Randkerben zu beseitigen, Schnittflächen zu überschleifen und Kanten zu brechen, siehe Abb. 2.14. Weiterhin sind einspringende Ecken durch Schleifen zu entfernen oder durch einen Spannungskonzentrationsfaktor zu berücksichtigen. Für infolge Hartem Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln gekennzeichnete Versuchskörper existieren keine eigenen Kerbfallklassen. Die Frage nach der Größe des Einflusses dieser Markiermethoden auf die Ermüdungsfestigkeit verlangt daher dringend nach einer Klärung.

Klassifizierung von Hart- und Weichprägungen

In den einschlägigen Normen wie DIN EN 1090-2 wird wiederholt auf Hart- bzw. Weichprägungen verwiesen, wenn beispielsweise der Einsatz von harten Kennzeichnungsmethoden ausgeschlossen wird und der Einsatz von Weichprägungen geprüft werden soll. Eine Definition, welche eine exakte Einteilung in harte oder weiche Kennzeichnungsmethoden liefert, erfolgt allerdings nicht. EN 1090-2 [14] liefert hier im Englischen mit den Begriffen „hard stamps“ und „soft or low stress stamps“ eine genauere Differenzierung. Demnach sind alle Kennzeichnungen, welche geringe Spannungen innerhalb des Werkstoffes oder Bauteils hervorgerufen, als „low stress stamps“, also Weichprägungen, einzustufen, siehe auch [15]. Geringe Spannungen werden vor allem durch weiche, fließende Übergänge zwischen der Markierung und dem Grundmaterial erreicht. Darüber hinaus fördert eine insgesamt runde Markiergeometrie einen günstigeren Kräftefluss, wodurch wiederum lokale Spannungsspitzen minimiert werden. Nach dieser Einordnung sollten die Markiermethoden Hartes Stempeln und Fräsen zunächst als harte Markiermethoden eingestuft werden.

Die Klassifizierung von Plasma- und Nadelmarkierungen stellt sich als komplexer dar. Plasmamarkierungen erzeugen in der Regel weiche und ausgerundete Markierkerben, wonach sie als weiche Markiermethoden einzustufen wären. Während des Plasmamarkiervorgangs wird allerdings Hitze in den Werkstoff eingebracht, welche das Gefüge verändert und die Randschichten aufhärtet. Dieser Effekt ist für das Plasmamarkieren bisher nicht quantitativ einzuordnen, wodurch das

Plasamarkieren als Hartprägung einzustufen wäre. Zudem ist bisher nicht geklärt, inwiefern reproduzierbare Markierungen erstellt werden können. Die Problematik ungleichmäßiger Markierungen wurde in Abschnitt 2.2.2 bereits erläutert, weshalb für diese Markiermethode bisher keine Klassifizierung möglich ist und sie somit – auf der sicheren Seite liegend – in der Regel als Hartprägung eingestuft wird.

Bei Nadelmarkierungen erfolgt die Einstufung als harte oder weiche Markiermethode bisher abhängig von der Geometrie der Nadelspitze. Für Markiernadeln mit Nadelspitzen ohne definierte Ausrundung am Nadelkopf muss die produzierte Markierung zunächst als Hartprägung eingestuft werden. Bei einer speziell abgerundeten Nadelspitze ergeben sich im Gegensatz dazu ausgerundete Markierkerben, weshalb in diesen Fällen in der Regel von einer Weichprägung gesprochen wird.

2.5.2 Untersuchungen zur Ermüdung gekennzeichnete Bauteile

Allgemeines

Der Einfluss von dauerhaften Kennzeichnungen auf das Ermüdungsverhalten wurde bisher nicht hinreichend untersucht. Im Rahmen einer intensiven Literaturrecherche konnten mit einer Ausnahme keine Publikationen zum Einfluss von Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen gefunden werden. Während der Recherche konnte lediglich ein Beitrag der SLV Halle zu Untersuchungen zum Plasamarkieren sowie zu Hartstempelungen von dünnen Blechen bis 10 mm Dicke eruiert werden [16].

Untersuchungen zum Plasamarkieren der SLV Halle

Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Halle hat sich im Rahmen eines Forschungsvorhabens [16], gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, mit dem Einfluss des Plasamarkierens sowie von Schlagstempelungen auf die Ermüdungsfestigkeit dünner Stahlbleche beschäftigt. Der Schwerpunkt der Untersuchung wurde auf die Auswirkungen unterschiedlicher Stromstärken beim Plasamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit gelegt. Untersucht wurden im Rahmen des Projekts Markierstromstärken von 6 A, 10 A und 14 A. Die zugehörige Markiergeschwindigkeit betrug für alle Stromstärken 3 m/min. Die Markierungen wurden auf Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2+N

mit Blechdicken von $t = 3\text{ mm}$ und $t = 10\text{ mm}$ sowie auf Prüfkörpern aus S355J2H mit einer Blechdicke von $t = 5\text{ mm}$ aufgebracht. Die Ermüdungsversuche wurden mit unterschiedlichen Grenzspannungsverhältnissen $R = 0,1$, $R = 0,5$ und $R = -1$ durchgeführt. Neben den Untersuchungen mit plasmamarkierten Versuchskörpern wurde zusätzlich eine Versuchsreihe mit durch Schlagstempelung markierten Proben durchgeführt und ausgewertet. Eine Übersicht der Versuchsparameter ist in Tabelle 2.1 dargestellt. Die entsprechenden Kennzeichnungen der Prüfkörper sind in Abb. 2.25 dargestellt. Die Plasmamarkierungen wurden mit den kombinierten Plasmaschneid- und -markieranlagen HiFocus 80i und HiFocus 160i der Firma Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH hergestellt.

Tab. 2.1 Versuchsmatrix zur Durchführung von Ermüdungsversuchen nach [16]

R	Anzahl Ermüdungsversuche			
	t = 3 mm	t = 5 mm		t = 10 mm
		80i ^a	160i ^b	
Plasma (6 A, 3 m/min)				
0,1	4	3	5	-
0,5	-	DL ^c	3	-
-1,0	-	2	3	-
Plasma (10 A, 3 m/min)				
0,1	5	8	5	4
0,5	DL ^c	7	6	3
-1,0	-	5	-	-
Plasma (14 A, 3 m/min)				
0,1	-	5	-	-
0,5	-	6	-	-
-1,0	-	-	-	-
Schlagstempelung				
0,1	4			
^a HiFocus 80i, Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH				
^b HiFocus 160i, Kjellberg Finsterwalde Plasma und Maschinen GmbH				
^c Versuchsserie mit ausschließlich produzierten Durchläufern				

Die Ermüdungsversuche wurden im Rahmen dieser Arbeit entsprechend DIN EN 1993-1-9 sowie dem zugehörigen Hintergrundbericht [17] statistisch als 95 %-Fraktile mit 95 %-Überlebens- und 75 %-Vertrauenswahrscheinlichkeit ausgewertet, wenngleich sich nicht für alle Versuchsserien Wöhlerlinien ermitteln ließen, siehe Abb. 2.26, Abb. 2.27 und Abb. 2.28. Ferner konnten keine Informationen zur Versagensart eruiert werden. Bei der Auswertung wurde daher davon ausge-

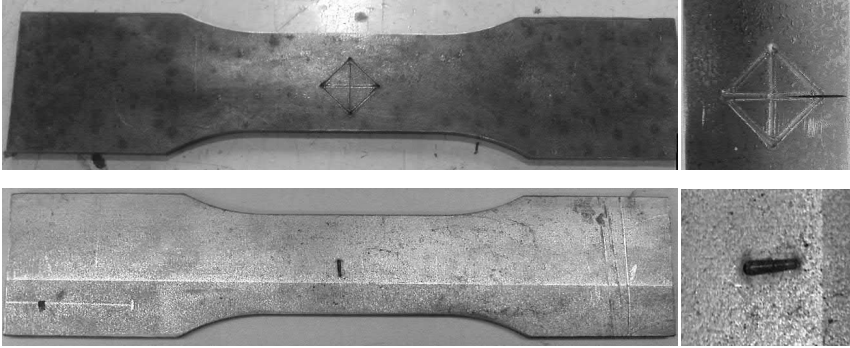


Abb. 2.25 Beispielfotos von Prüfkörpern mit Plasmamarkierung (oben) und Schlagstempelung (unten) [16]

gangen, dass Versuche, welche nicht als Durchläufer gekennzeichnet waren, mit einem Riss von der Markierung aus versagten. Die Versuchsserien wurden für die eigene Auswertung nach dem Bezeichnungsschema *SLV-xx-yy-zz* benannt. Hierbei stehen *xx* für die Angabe der Blechdicke der Prüfkörper in mm, *yy* für die Angabe der Markierstromstärke bzw. der Markiermethode und *zz* für die Angabe des Spannungsverhältnisses.

In Abb. 2.26 ist zu erkennen, dass sich der Einfluss der Plasmamarkierung auf die Ermüdungsfestigkeit bei einer Markierstromstärke von 6 Ampere als vernachlässigbar klein herausstellt. Für ein Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ und $R = -1$ ergeben sich Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln von $\Delta\sigma_{c,95\%} \geq 313 \text{ N/mm}^2$, wobei für die Versuchsserie SLV-3-6A-0,1 aufgrund der geringen Probenanzahl von $n = 2$ nur der Mittelwert von $\Delta\sigma_{c,50\%} \geq 294 \text{ N/mm}^2$ ermittelt werden kann. Erst bei einem ungünstigen Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ ergibt sich tendenziell mit ca. $\Delta\sigma_{c,50\%} \approx 200 \text{ N/mm}^2$ eine Ermüdungsfestigkeit unterhalb der Referenzversuchsserie mit gestempelten Versuchskörpern und $R = 0,1$ ($\Delta\sigma_{c,95\%} = 238 \text{ N/mm}^2$). Aufgrund der geringen verwertbaren Probenanzahl von $n = 2$ kann die Ermüdungsfestigkeit dieser Serie lediglich als erste Tendenz gewertet werden. Die Aussagekraft ist für diese Serie sehr begrenzt. Die aus den Versuchen ermittelten Neigungen der Wöhlerlinien sind dabei mit $m \geq 13$ als flach einzustufen.

Bei einer Markierstromstärke von 10 Ampere ergeben sich ebenfalls vergleichsweise hohe Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit, siehe Abb. 2.27. Für Blechdicken von $t = 3 \text{ mm}$, $t = 5 \text{ mm}$ und $t = 10 \text{ mm}$ ergeben sich bei einem Spannungsverhält-

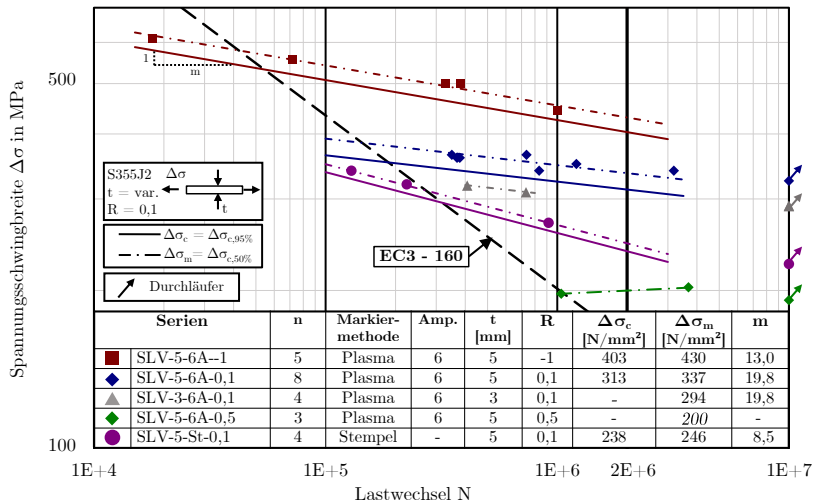


Abb. 2.26 Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durchgeführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsserien mit einer Markierstromstärke von 6 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]

nis von $R = 0,1$ und $R = -1$ Ermüdungsfestigkeiten von $\Delta\sigma_{c,95\%} \geq 252 \text{ N/mm}^2$. Lediglich für die Versuchsserie SLV-10-10A-0,1 ergibt sich aufgrund der geringen verwertbaren Probenanzahl von $n = 3$ sowie den vergleichsweise großen Streuungen innerhalb dieser drei Ergebnisse eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 149 \text{ N/mm}^2$, womit die tatsächliche Ermüdungsfestigkeit sicherlich unterschätzt wird. Der Mittelwert der Ermüdungsfestigkeit liegt hingegen bei $\Delta\sigma_{c,50\%} = 194 \text{ N/mm}^2$.

Bei einem ungünstigeren Spannungsverhältnis von $R = 0,5$ resultiert für eine Blechdicke von 5 mm eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 188 \text{ N/mm}^2$. Für eine Blechdicke von 10 mm resultiert tendenziell eine geringere Ermüdungsfestigkeit von ca. $\Delta\sigma_{c,50\%} = 179 \text{ N/mm}^2$, wenngleich sich aufgrund der geringeren Probenanzahl von $n = 2$ hier keine abschließende Aussage treffen lässt.

Insbesondere für die Serien SLV-5-6A-0,5, SLV-3-6A-0,1 und SLV-10-10A-0,5 ist aufgrund der geringen verwertbaren Probenanzahl sowie der teilweise negativen Steigung der Wöhlerlinie grundsätzlich keine verlässliche Aussage zur Ermüdungsfestigkeit möglich.

Die Versuchsserien mit Versuchskörpern, welche mit einer Markierstromstärke von 14 Ampere markiert wurden, zeigen ebenfalls vergleichsweise positive

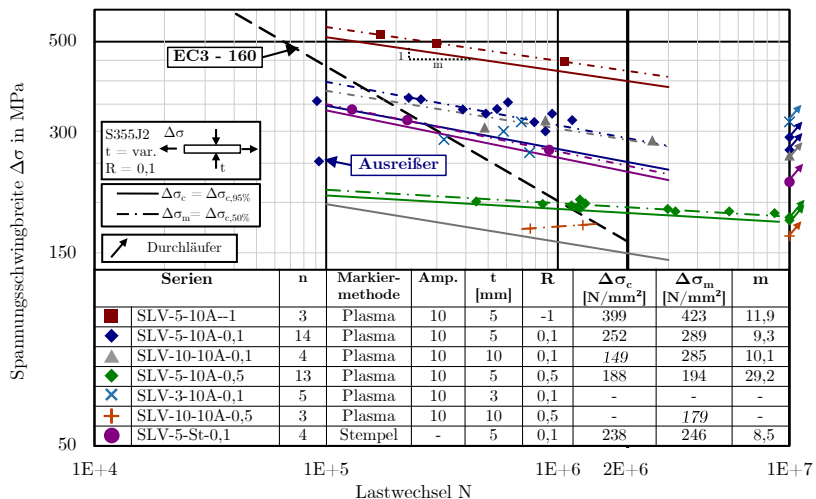


Abb. 2.27 Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durchgeführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsserien mit einer Markierstromstärke von 10 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]

Ergebnisse. Die zwei untersuchten Serien mit einer Blechdicke von $t = 5$ mm liefern Ermüdungsfestigkeiten von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 263 \text{ N/mm}^2$ bei einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 168 \text{ N/mm}^2$ mit $R = 0,5$, sodass auch hier insgesamt hohe Kerbfallklassen resultieren.

Es zeigt sich, dass erwartungsgemäß der Einfluss der Plasmamarkierung auf die Ermüdungsfestigkeit tendenziell mit zunehmender Markierstromstärke, respektive abnehmender Markiergeschwindigkeit, steigt. Die Ergebnisse sind hier zwar nicht durchgängig eindeutig, dies kann jedoch auf die teilweise deutlich zu geringe Stichprobenanzahl zurückgeführt werden. Die im Rahmen der Versuche ermittelten Ermüdungsfestigkeiten liegen nichtsdestotrotz auf einem sehr hohen Niveau.

Die Referenzserie mit schlaggestempelten Versuchskörpern erzielt eine insgesamt sehr hohe Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 238 \text{ N/mm}^2$.

In [16] wird eine Auswertung der Ermüdungsversuche gemäß IIW-Empfehlungen [18] mit einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 97,5 % durchgeführt. Bei der Auswertung wird zudem eine größere Streuung berücksichtigt als aus den Versuchsda-

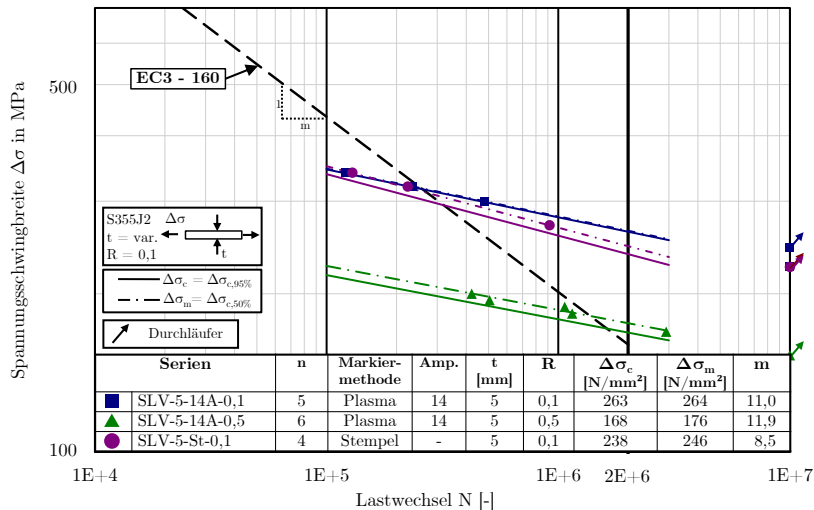


Abb. 2.28 Ergebnisse in Form von Wöhlerlinien der an der SLV Halle durchgeführten Ermüdungsversuche von plasmamarkierten Versuchsserien mit einer Markierstromstärke von 14 A sowie der gestempelten Referenzversuchsserie nach [16]

ten hervorgeht, weshalb in Summe aller Versuche konservativ eine Kerbfallklasse FAT 125 ermittelt wird.

Der auch in den Versuchen beobachtete nachteilige Effekt größer werdender Stromstärken lässt sich durch die unterschiedlichen Einbrandtiefen infolge der Plasmamarkierung erklären, siehe Abb. 2.29. Den einzelnen Schlibbildern ist deutlich zu entnehmen, dass sich die Markiertiefe mit variierender Stromstärke verändert. Gemessen wurden die Markiertiefen jeweils an zwei Punkten M1 und M2 der Kennzeichnungen, wobei die Punkte M1 die Markiertiefe inmitten einer Markierlinie darstellen und die Punkte M2 immer an Umkehr- bzw. Wendepunkten einer Markierung liegen. Aufgrund der minimalen Verweildauer des Plasmamarkers stellte sich an diesen Punkten eine trotz gleicher Markierparameter größere Markiertiefe ein. Als Ergebnis der Untersuchungen wurden Markiertiefen zwischen 9 μm (6 Ampere, M1) und 870 μm (14 Ampere, M2) gemessen. Im Vergleich lagen die Eindringtiefen der Schlagstempelung zwischen 320 μm und 640 μm .

Neben den Ermüdungsversuchen wurden an der SLV Halle auch Untersuchungen zur Lesbarkeit von Plasmamarkierungen durchgeführt. Dabei wurden Plasma-

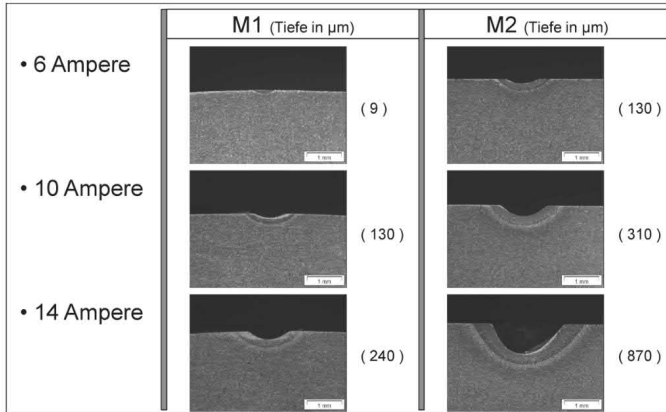


Abb. 2.29 Markiertiefen infolge unterschiedlicher Plasmamarkierungen [16]

markierungen mit den zuvor untersuchten Stromstärken 6 A, 10 A und 14 A auf Bleche und Hohlprofile aufgebracht und anschließend durch verschiedene Bearbeitungsprozesse wie Beschichten oder Feuerverzinken nachbehandelt. Bei einer Markierstromstärke von 6 A waren nach der Behandlung der Proben durch Strahlen und Beschichten die Zeichen der Plasmamarkierung nicht mehr lesbar. Bei einer Markierstromstärke von 10 Ampere war die Kennzeichnung nach dieser Behandlung noch in den tieferen Ansatz- und Umkehrpunkten der Markierung lesbar, vgl. Abb. 2.30.

Nach einer Behandlung durch Feuerverzinken mit gemessenen Zinkschichtdicken von 100 bis 140 μm ließen sich die Kennzeichnungen bei einer Markierstromstärke von 6 A nicht mehr entziffern, vgl. Abb. 2.31. Bei einer Stromstärke von 10 A war die Kennzeichnung hingegen noch lesbar.

Bei den vorgenannten Untersuchungen der SLV Halle wurden Blechdicken bis maximal 10 mm und Stahlsorten S355J2+N sowie S355J2H untersucht. Aufgrund der Ergebnisse stellt sich die Frage, inwieweit der Einfluss der Plasmamarkierung bei größeren, im Stahlbau durchaus üblichen Blechdicken oder anderen Stahlsorten/Festigkeitsklassen zum Tragen kommt. Darüber hinaus ist zu klären, wie sich andere dauerhafte Markiermethoden verhalten.

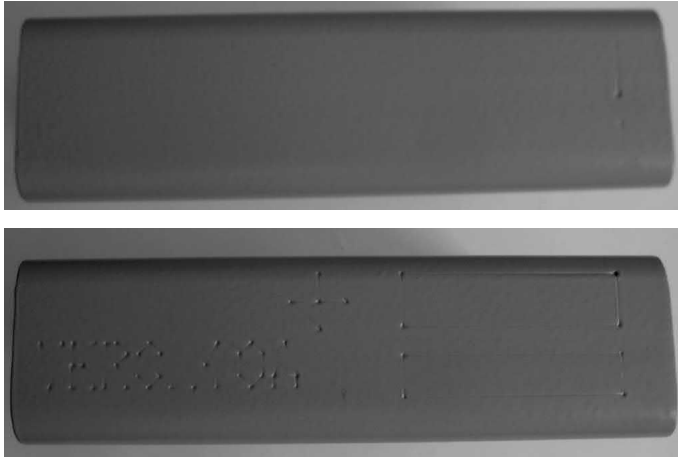


Abb. 2.30 Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere (oben) und 10 Ampere (unten) nach einer Behandlung durch Strahlen und Beschichten [16]

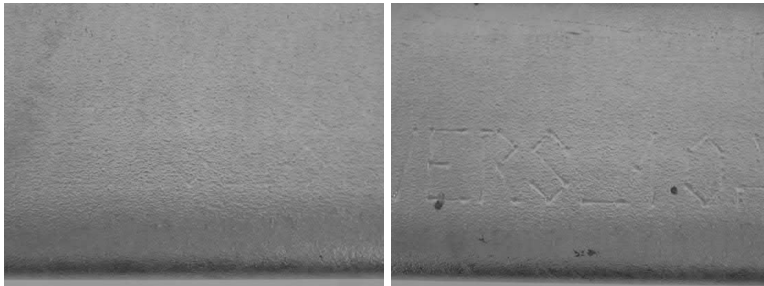


Abb. 2.31 Sichtbarkeit von Plasmamarkierungen mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere (links) und 10 Ampere (rechts) nach einer Behandlung durch Strahlen und Feuerverzinken [16]

2.6 Zusammenfassung

Für die dauerhafte Kennzeichnung von Stahlbauteilen werden neben weiteren insbesondere die Methoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren sowie Nadeln eingesetzt, welche sich in Produktions- und Fertigungsstraßen einbinden lassen. Neben den Vorteilen im Hinblick auf eindeutige und vor allem dauerhafte Identifizierbarkeit von Bauteilen resultieren aus dem Markierprozess jedoch Oberflächenkerben, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der markierten Bauteile haben können. Aus diesem Grund ist der Einsatz von dauerhaften

Kennzeichnungen in ermüdungsbeanspruchten Bereichen oder Bauteilen gemäß einschlägiger Normen für den Stahlbau verboten, wohingegen teilweise explizit harte Kennzeichnungsmethoden gefordert werden. Dies stellt einen Widerspruch dar und wirft die Frage nach der Ausführbarkeit auf.

Der Einfluss von aus dem Markierprozess resultierenden Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen wurde bisher nicht hinreichend untersucht. In [16] wurde der Einfluss des Plasmamarkierens mit unterschiedlichen Stromstärken auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen ermittelt. Das Versuchsprogramm umfasste Blechdicken bis zu 10 mm. Diese Versuche liefern vergleichsweise hohe Ermüdungsfestigkeiten, teilweise deutlich oberhalb einer Kerbfallklasse 160.

Untersuchungen zum Einfluss von Blechdicken größer als 10 mm, von Stahlsorten mit Streckgrenzen über 355 N/mm^2 sowie weiteren Markiermethoden konnten trotz ausführlicher Literaturrecherche nicht eruiert werden. Der tatsächliche Einfluss der Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit von Stahlbauteilen stellt daher eine dringend zu klärende Frage dar.

3 Bestimmung der Ermüdungsfestigkeiten infolge dauerhafter Kennzeichnungen

3.1 Allgemeines

Der Einfluss der Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen wird im Folgenden anhand durchgeführter Ermüdungsversuche charakterisiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden unter Berücksichtigung der Erkenntnisse der mikroskopischen Betrachtungen zur Bestimmung der geometrischen Eigenschaften der Markierkerben in Kapitel 4 bewertet.

Die experimentellen Untersuchungen wurden zu einem Großteil im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 17218 N „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ durchgeführt. Im Anschluss an das Projekt wurden weitere Ermüdungsversuche durchgeführt, um die Datenbasis zu erweitern und damit zur Klärung noch offener Fragestellungen zu nicht eindeutigen Versuchsergebnissen beizutragen. Ziel der Versuche war die Ermittlung des Einflusses der vier bereits genannten Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit von markierten Stahlbauteilen unter Berücksichtigung der beiden im Stahlbau üblichen Stahlsorten S355J2 und S460N sowie der drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind zu einem Großteil auch in [4, 19–21] enthalten, werden aber im Rahmen dieser Arbeit unter Berücksichtigung der weiteren Ergebnisse behandelt und differenziert ausgewertet. Aufgrund der thematischen Überschneidung mit den Arbeiten in [4] können sich Abschnitte teilweise ähneln oder gleichen.




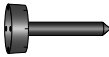
Die durchgeführten Versuche lassen sich grundlegend in zwei Serien einteilen. Die Ermüdungsversuche, welche im Rahmen von *Voruntersuchungen* zu oben genanntem Forschungsvorhaben entstanden sind, werden im Folgenden auch als *Voruntersuchungen* bezeichnet. Die Versuche im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens 17218 N „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ sowie alle darüber hinaus mit identischen Markierungen durchgeführten Versuche werden im Folgenden

als *Hauptuntersuchungen* bezeichnet und stellen den Großteil des Versuchsprogramms dar. Hier lagen im Gegensatz zu den *Voruntersuchungen* hinsichtlich Materialgüten, Markierparametern und Blechdicken definiertere Zustände vor, weshalb im Zuge der Versuchsbeschreibung eine getrennte Erläuterung als sinnvoll erachtet wird. Die Versuchsauswertung erfolgt dann soweit möglich für alle Versuchsserien aus *Vor-* und *Hauptuntersuchungen*.

Umfang aller durchgeführten Ermüdungsversuche

Der Umfang aller durchgeführten Ermüdungsversuche, sowohl aus *Vor-* als auch aus *Hauptuntersuchungen* ist Tabelle 3.1 zu entnehmen. In der Summe wurden 189 Ermüdungsversuche durchgeführt.

Tab. 3.1 Versuchsumfang der *Vor-* und *Hauptuntersuchungen*

Anzahl	Gesamt	Stahlgüte	Markiermethode	<div><div>t</div><div>mm</div></div>	R
27 16 15	58	S355J2/ S460N	Stempeln		15 25 40 0,1
24 16 13					
26 13 16 7					
24 16 13	53	S355J2/ S460N	Fräsen		15 25 40 0,1
26 13 16 7					
26 13 16 7					
26 13 16 7	62	S355J2/ S460N S235JR	Plasma		15 25 40 15 0,1
26 13 16 7					
26 13 16 7					
16	-	var.	Nadeln		var. 0,1
Summe: 189 Ermüdungsversuche					

Während der *Voruntersuchungen* wurden in der Regel Versuchskörper aus S355J2, S235JR und S460N behandelt. Die Blechdicken im Zuge der *Voruntersuchungen* betrugen meist 15 mm, teilweise wurden auch abweichende Blechdicken untersucht. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass während der *Voruntersuchungen* seitens der Industrie zur Verfügung gestelltes Material ohne weitere Spezifikation bereitgestellt wurde. Hier galt es lediglich, einen Einblick in die Thematik zu gewinnen.

Die Ermüdungsversuche wurden im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* an Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2 und S460N sowie an je drei Blechdicken 15 mm,

25 mm und 40 mm durchgeführt. Die untersuchten dauerhaften Kennzeichnungen umfassten die im Stahlbau geläufigen Markiermethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln.

Die in [4] gewählte Namensgebung zur eindeutigen Identifizierbarkeit der Versuchsserien und -körper wurde im Rahmen dieser Arbeit zur besseren Übersicht modifiziert und ist in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Bezeichnungen der Versuchsserien der *Hauptuntersuchungen* haben abweichend zu den Bezeichnungen in [4] ein Kürzel „h“ hinter der Stahlsortenkennzeichnung. Die Namen der Versuchsserien und -körper der *Voruntersuchungen* wurden im Gegensatz zu [4] an das Namensschema der *Hauptuntersuchungen* angepasst. Versuchsserien im Rahmen der *Voruntersuchungen* sind mit einem „v“ hinter dem Kürzel der Stahlsorte gekennzeichnet. Die Abmessungen der untersuchten Prüfkörper sind in Abb. 3.1 dargestellt. Alle verwendeten Materialien wurden mit Abnahmeprüfzeugnis 3.1 geliefert.

Tab. 3.2 System zur Benennung der Versuchsserien und -körper

„355 ^a -15-St-01“				
(1)	(2)		(3)	(4)
Stahlsorte	Blechdicke		Markiermethode	laufende Nr.
S235JR: 235	15 mm:	15	Hartes Stempeln:	St
S355J2: 355	25 mm:	25	Fräsen:	Fr
S460N: 460	40 mm:	40	Plasma:	Pl
			Nadeln:	Na
^a Voruntersuchungen: „v“ hinter der Stahlsortenkennung Hauptuntersuchungen: „h“ hinter der Stahlsortenkennung				

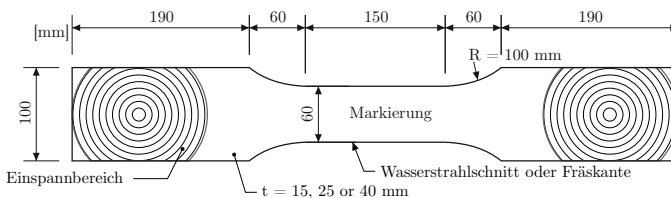


Abb. 3.1 Geometrie der Versuchskörper

3.2 Herstellung und Charakterisierung der Prüfkörper

3.2.1 Voruntersuchungen

Die in den *Voruntersuchungen* durchgeführten Ermüdungsversuche an markierten (Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln) Prüfkörpern wurden in Vorbereitung auf das IGF-Vorhaben 17218 N geprüft, um erste Erkenntnisse über den Einfluss dauerhafter Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit zu erlangen. Der Fokus lag hier insbesondere auf dem Vergleich der Markiermethoden untereinander. Variierende Blechdicken oder Stahlsorten wurden nicht gezielt als unabhängige Parameter untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche findet sich in [4], welche hier zusammenfassend dargestellt wird.

Die Ermüdungsversuche wurden an Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2+N, Blechdicke $t = 15$ mm (unmarkiert, Fräsen und Hartstempelung) sowie S235JR+N, S235J2+N, S235J2C+N und S460N mit Blechdicken von $t = 10, 12, 15$ und 30 mm (Nadeln) durchgeführt. Darüber hinaus wurden Prüfkörper der Stahlsorte S235JR+AR und S355J2+N, Blechdicke $t = 15$ mm (Plasmamarkieren) untersucht, siehe Tabelle 3.3.

Tab. 3.3 Versuchsprogramm im Rahmen der *Voruntersuchungen*

Markierung	Stahlsorte	Anzahl Prüfkörper	t mm
Unmarkiert	S355J2+N	2	15
Fräsen		12	15
Hartes Stempeln		10	15
Nadeln	S235JR+N	1	16
	S235J2+N	1	12
	S235J2C+N	2	10
	S235J2C+N	1	12
	S355J2+N	1	30
	S460N	2	15
Plasma	S355J2+N	10	15
	S235JR+AR	7	15

Im Rahmen der *Voruntersuchungen* sollte u. a. für die plasmamarkierten Serien der Einfluss unterschiedlicher Markierstromstärken und -geschwindigkeiten auf die ertragbaren Lastwechselzahlen ermittelt werden. Da alle plasmamarkierten Versuchskörper auf dem gleichen Lastniveau getestet wurden, konnten keine Wöhlerlinien ermittelt werden. Für die restlichen Markiermethoden wurden Wöhlerlinien und Ermüdungsfestigkeiten ermittelt. Die Markierungen für die

Methoden Hartes Stempeln, Fräsen und Nadeln sollten in Größe und Form möglichst identisch sein, sodass gleiche Ausgangsvoraussetzungen vorlagen. Hierzu wurde eine Buchstaben- und Zahlenkombinationen gewählt, siehe exemplarisch Abb. 3.2. Diese konnte allerdings seitens der beteiligten Firmen nur bei den gestempelten Versuchskörpern umgesetzt werden, sodass vom ursprünglichen Markierlayout teilweise abgewichen wurde, siehe auch [4].

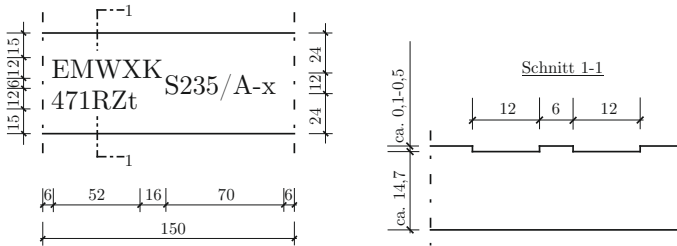


Abb. 3.2 Beispiel der Kennzeichnungssystematik für die gestempelten Versuchskörper der *Voruntersuchungen*

3.2.2 Hauptuntersuchungen

Allgemeines

Als Werkstoffe für die Ermüdungsversuche im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* wurden die Stahlsorten S355J2 nach DIN EN 10025-2 [22] sowie S460N nach DIN EN 10025-3 [23] in drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm verwendet. Eine Übersicht der Materialparameter ist in Tabelle 3.4 dargestellt. Für die zu installierenden Kerben wurden Layouts nach Abb. 3.3 für die Plasma- und Fräsmarkierungen, Abb. 3.4 für die gestempelten Prüfkörper und Abb. 3.5 für die Nadelmarkierungen aufgebracht, siehe auch [4].

Die Planung der *Hauptuntersuchungen* sah ferner vor, dass alle Versuchskörper gleicher Stahlsorten und gleicher Blechdicken aus einer Stahlschmelze hergestellt werden, um eventuelle Effekte unterschiedlicher Materialeigenschaften auszuschließen. Des Weiteren sollten alle Kennzeichnungen mit möglichst reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden, um künstliche Streuungen innerhalb einer Markiermethode auszuschließen und neben den bewusst variierten Parametern wie Blechdicke und Stahlsorte keine weiteren Einflüsse aus nicht vergleichbaren Kennzeichnungen zu erhalten. Für die gefrästen Versuchskörper musste von diesen Anforderungen abgewichen werden, sodass die Prüfkörper

Tab. 3.4 Materialkennwerte

Stahlsorte	Markiermethode	t	Schmelzen-Nr.	R_{eH}	R_m
		mm		N/mm ²	N/mm ²
S355J2+N	Stempeln,	15	20363	398	540
S355J2+N	Plasma,	25	12169	371	545
S355J2+N	Nadeln	40	54336	397	570
S355J2+N	Fräsen	15	57154	458	578
S355J2+N		25	14K10526	393	537
S355J2+N		40	928109	415	576
S460N	Stempeln, Fräsen, Plasma, Nadeln	15	46270	502	598
S460N		25	686092	488	588
S460N		40	382370	530	659

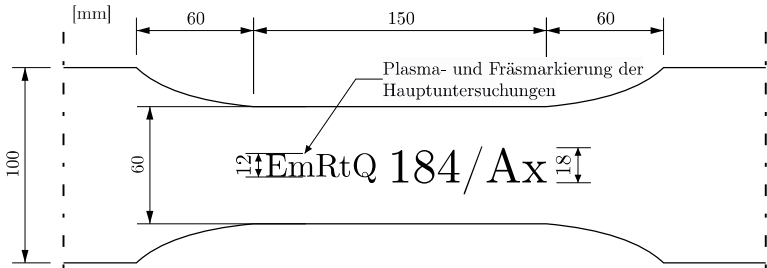


Abb. 3.3 Gewählte Markiergeometrie für plasmamarkierte sowie gefräste Versuchskörper

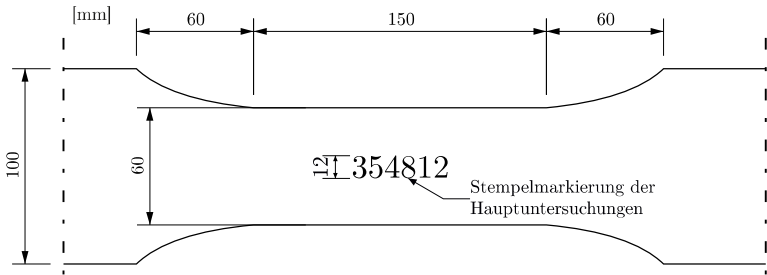


Abb. 3.4 Markiergeometrie für gestempelte Versuchskörper

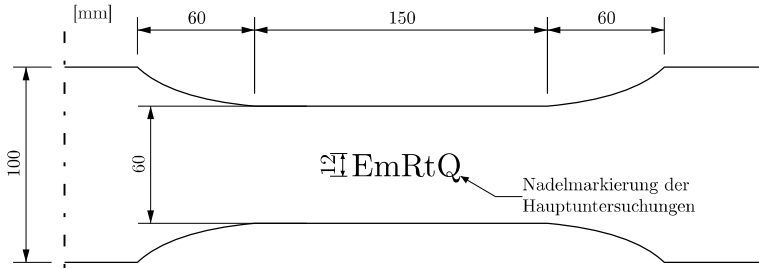


Abb. 3.5 Markiergeometrie für genadelte Versuchskörper

der Versuchsserien 355h-15-Fr, 355h-25-Fr und 355h-40-Fr im Vergleich zu den weiteren Markiermethoden aus unterschiedlichen Blechen hergestellt wurden. Ferner unterschieden sich die Markiertiefen der Fräsmarkierungen der Prüfkörper aus S355 und S460 in der Markiertiefe, da die Versuchskörper nicht in einem Arbeitsgang markiert wurden und zum Zeitpunkt der Markierungen auf der entsprechenden Fräsmaschine mit unterschiedlichen Markierparametern gearbeitet wurde, siehe auch [4].

Zugversuche

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ferner Zugversuche an allen eingesetzten Materialien der *Hauptuntersuchungen* durchgeführt, ergänzend zu den in [4] bereits durchgeführten Zugversuchen. Die Dehnungen der Proben wurden kontinuierlich mithilfe eines Videoextensometers berührungsfrei gemessen, was eine genaue Ermittlung der plastischen Dehnungen zur Ermittlung eines Materialgesetzes für die Finite Elemente Berechnungen ermöglichte.

Die Herstellung der Prüfkörper für die Ermüdungsversuche und somit auch die Markierung und spätere Belastung erfolgte im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* ausschließlich längs zur Walzrichtung des Grundmaterials. Folglich wurden die Zugversuche ebenfalls mit Proben durchgeführt, welche längs zur Walzrichtung entnommen wurden.

Für die Durchführung der Zugversuche wurden Zugproben des Typs B8×40 nach DIN 50125 [24] hergestellt. Je Blechdicke und Stahlorte wurden drei Versuche durchgeführt.

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Tabelle 3.5 im Vergleich zu den aus den Abnahmeprüfzeugnissen entnommenen Werten angegeben. Die ermittelten mechanischen Kennwerte aus den Zugversuchen erfüllen die Anforderungen in Bezug auf Mindeststreckgrenze und -zugfestigkeit. Die ermittelten Kennwerte Streckgrenze und Zugfestigkeit stimmen zudem weitestgehend sehr gut mit den Kennwerten aus den zur Verfügung gestellten Abnahmeprüfzeugnissen 3.1 überein.

Tab. 3.5 Ergebnisse der Zugversuche an Flachzugproben längs zur Walzrichtung

	t mm	R_{eH}		ΔR_{eH}	R_m		ΔR_m	R_m/R_{eH}	
		N/mm ²		%	N/mm ²		%		
		APZ 3.1 ^a IML ^b			APZ 3.1 ^a IML ^b			APZ 3.1 ^a IML ^b	
S355 ^c	15	398	455	12,5	540	569	5,1	1,36	1,25
	25	378	382	1,0	545	553	1,5	1,44	1,45
	40	397	430	7,7	570	577	1,2	1,44	1,34
	15-Fr	458	433	5,5	578	566	2,1	1,26	1,26
	25-Fr	393	393	0,0	537	541	0,7	1,37	1,37
	40-Fr	415	441	5,9	576	573	0,5	1,39	1,39
S460 ^d	15	502	478	4,8	598	608	1,6	1,19	1,19
	25	488	489	2,0	588	613	4,1	1,20	1,20
	40	530	548	3,3	659	659	0,0	1,24	1,24

^a Werte gemäß APZ 3.1
^b Werte aus den am Institut für Metall- und Leichtbau durchgeführten Zugversuchen
^c S355J2 nach DIN EN 10025-2 [22] mit $R_{eH,min} = 355$ MPa für $t \leq 16$ mm und $R_{eH,min} = 345$ MPa für $16 < t \leq 40$ mm
^d S460N nach DIN EN 10025-3 [23] mit $R_{eH,min} = 460$ MPa für $t \leq 16$ mm und $R_{eH,min} = 440$ MPa für $16 < t \leq 40$ mm

Lediglich bei den Kennwerten der Prüfserie S355-15 ergeben sich nennenswerte Abweichungen zwischen gemessenen Werten und den Angaben nach APZ 3.1 von $\Delta R_{eH} = 12,5\%$ und $\Delta R_m = 5,1\%$. Exemplarische gemessene Spannung-Dehnung-Linien für Grundmaterial der Nenndicke 25 mm sind in Abb. 3.6 für S355J2 und Abb. 3.7 für S460N dargestellt. Ein Vergleich zwischen gemessenen und nominellen Festigkeiten zeigt, dass für die Stahlsorte S355J2 die gemessenen Streckgrenzen zwischen 10 % und 28 % und für die Stahlsorte S460N zwischen 4 % und 25 % oberhalb der Mindeststreckgrenzen nach DIN EN 10025-2 und DIN EN 10025-3 liegen.

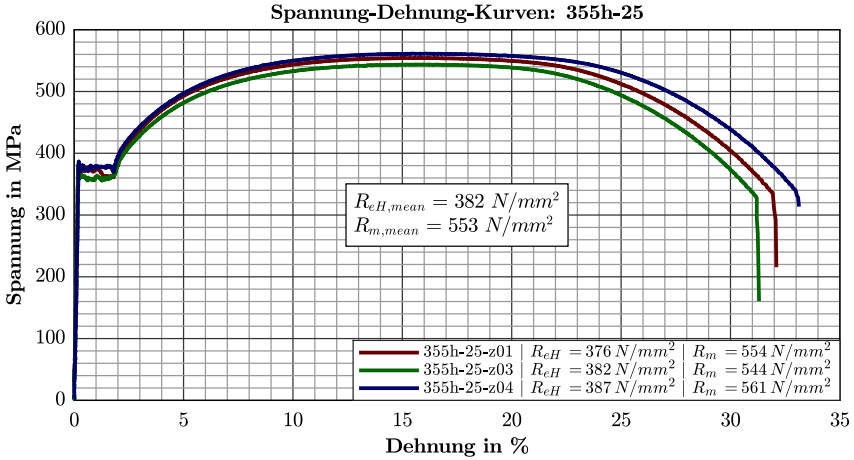


Abb. 3.6 Exemplarische Spannung-Dehnung-Kurven des Grundmaterials S355J2+N der Prüfsrie 355h-25

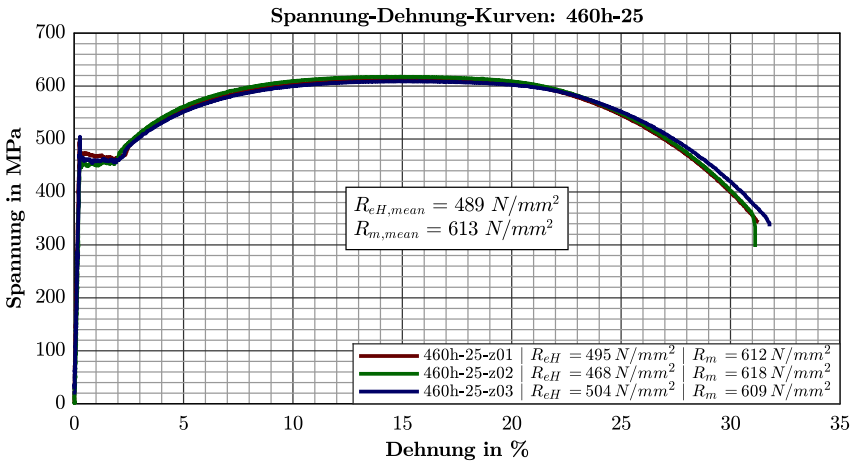


Abb. 3.7 Exemplarische Spannung-Dehnung-Kurven des Grundmaterials S460N der Prüfsrie 460h-25

3.3 Versuchsbeschreibung

Die Ermüdungsversuche erfolgten an zwei der institutseigenen servohydraulischen Pulsatoren mit statischen Nennkapazitäten von 1,0 MN und 1,6 MN, siehe Abb. 3.8. Die entsprechenden dynamischen Kapazitäten der Maschinen betragen 0,8 MN und 1,2 MN.

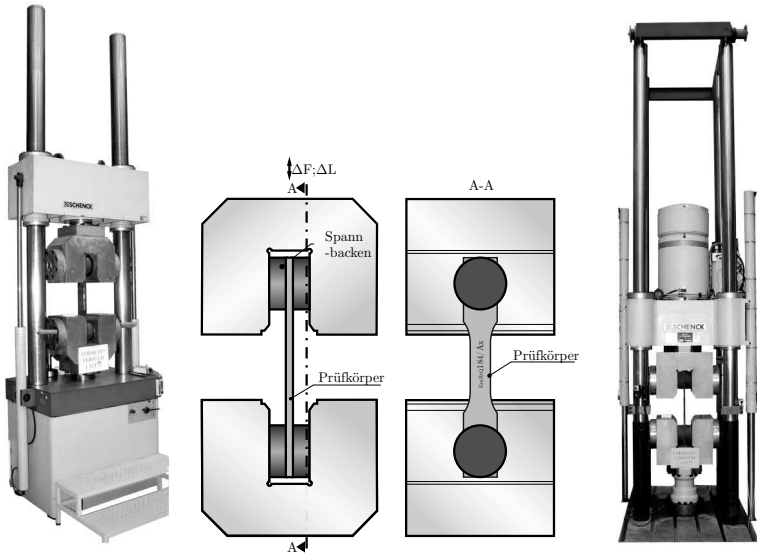


Abb. 3.8 Servohydraulische Prüfmaschinen des Instituts für Metall- und Leichtbau der Universität Duisburg-Essen mit Kapazitäten von 1,0 MN (links) und 1,6 MN (rechts)

Um maschinenbezogene Einflüsse innerhalb einer Versuchsserie zu vermeiden, wurde jeder Prüfkörper einer Serie durchgängig in derselben Maschine getestet. Des Weiteren wurden nicht nur die Versuche einer Serie sondern auch die Versuche aller Serien mit gleichen Blechdicken in je einer Maschine durchgeführt. Demnach wurden alle Versuchsserien und -körper mit Blechdicken von 15 mm und 25 mm in der 1,0 MN-Prüfmaschine getestet und alle Proben mit einer Blechdicke von 40 mm in der größeren 1,6 MN-Prüfmaschine.

Die Ermüdungsversuche wurden kraftgesteuert mit einer sinusförmigen Belastungskurve im Zugschwellbereich mit einem Spannungsverhältnis von $R=0,1$ und einem einstufigen Spannungskollektiv durchgeführt, siehe Abb. 2.23.

Mit Ausnahme der plasmamarkierten Versuchskörper im Rahmen der *Voruntersuchungen*, siehe Ausführungen zuvor, wurde die Höhe der aufgetragenen Spannungsschwingbreite iterativ auf Basis der erzielten Ergebnisse angepasst.

Alle Versuche wurden grundsätzlich bis zum Bruch der Versuchskörper gefahren. Versuche, die allerdings nach fünf Millionen Lastwechseln keinen Bruch oder erkennbaren Riss aufwiesen, wurden als Durchläufer deklariert.

3.4 Versuchsergebnisse durchgeführter Ermüdungsversuche an markierten Probekörpern

3.4.1 Allgemeines

Die Ermüdungsversuche der markierten Versuchskörper zeigen erwartungsgemäß einen eindeutigen Einfluss der drei Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit. Dieser hängt insbesondere von der Markiermethode und -geometrie sowie von der Blechdicke ab. Für Versuchskörper mit Nadelmarkierungen konnte sowohl im Rahmen der *Vor-* als auch der *Hauptuntersuchungen* nahezu kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten ermittelt werden.

Ein Einfluss der Streckgrenze des Grundmaterials auf das Ermüdungsverhalten konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht durchgängig festgestellt werden. Eine Übersicht der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 3.6 dargestellt.

Die Darstellung und Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt in Form von Wöhlerlinien mit doppellogarithmischer Achseneinteilung. Auf der Abszisse ist jeweils die Lastwechselzahl N und auf der Ordinate die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ als Nennspannung aufgetragen. Die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mithilfe der linearen Regression. Dabei wurden Wöhlerlinien in der Regel mit einer variablen, aus den Versuchsergebnissen resultierenden Steigung m ausgewertet. Zusätzlich wurden in den Wöhlerliniendiagrammen als Referenz die beiden Kerbfallklassen 125 und 160 nach DIN EN 1993-1-9 mit einer Neigung von $m = 3,0$ angegeben (schwarze Linie, punktiert und gestrichelt), welche die für die Bemessung günstigsten Kerbfälle darstellen. Der Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%}$ bei $2 \cdot 10^6$ Lastwechseln wurde entsprechend DIN EN 1993-1-9 sowie dem zugehörigen Hintergrundbericht [17] statistisch als

Tab. 3.6 Übersicht aller durchgeführten Ermüdungsversuche

Methode	Stahlsorte	t	n	R_{eH}	Serie	$\Delta\sigma_{min.}^b$	$\Delta\sigma_{max.}^c$
		mm		N/mm ² ^a		N/mm ²	N/mm ²
Hartes Stempeln	S355J2	15	9	398	355h-15-St	143	305
		15	10	395	355v-15-St	96	288
		25	7	371	355h-25-St	167	304
		40	8	397	355h-40-St	214	322
	S460N	15	8	502	460h-15-St	124	248
		25	9	488	460h-25-St	145	310
		40	7	530	460h-40-St	207	323
Fräsen	S355J2	15	7	458	355h-15-Fr	206	350
		15	12	395	355v-15-Fr	128	288
		25	6	393	355h-25-Fr	212	318
		40	7	415	355h-40-Fr	262	318
	S460N	15	5	502	460h-15-Fr	207	290
		25	10	488	460h-25-Fr	166	311
		40	6	530	460h-40-Fr	186	352
Plasma	S235JR	15	7	271	235v-15-Pl	190	190
	S355J2	15	8	398	355h-15-Pl	193	340
		15	10	385	355v-15-Pl	240	240
		25	7	371	355h-25-Pl	217	300
		40	8	397	355h-40-Pl	232	319
	S460N	15	8	502	460h-15-Pl	145	286
		25	6	488	460h-25-Pl	176	286
		40	8	530	460h-40-Pl	207	311
Nadeln	variabel	var.	8	var.	v-Na	190	256
	S355J2	15	2	398	355h-15-Na	320	320
		25	2	371	355h-25-Na	284	319
	S460N	15	2	502	460h-15-Na	319	319
		25	2	488	460h-25-Na	319	319
Summe		189 Ermüdungsversuche					
^a R_{eH} nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1							
^b kleinste untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie							
^c größte untersuchte Spannungsschwingbreite innerhalb der Serie							

95 %-Fraktile mit 95 %-Überlebens- und 75 %-Vertrauenswahrscheinlichkeit ermittelt. Ausgegeben sind die Wöhlerlinien für eine Überlebenswahrscheinlichkeit von $P_U = 95\%$ (Volllinien) sowie für $P_U = 50\%$ (Strich-Punktlinien). Für die statistische Auswertung wurden ausschließlich Versuchskörper berücksichtigt, welche infolge eines Rissausgangs von der Markierung versagten. Durchläufer oder Versuchskörper mit einem Ermüdungsversagen, welches nicht von der Markierung ausging (*Grundmaterialbruch*) wurden nicht berücksichtigt. Neben den

Bezugswerten der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%}$ und $\Delta\sigma_{c,50\%}$ sind die Steigung m sowie das Streumaß T_σ angegeben. Das Streumaß berechnet sich zu:

$$T_\sigma = \frac{\Delta\sigma_{c,5\%}}{\Delta\sigma_{c,95\%}} \quad (3.1)$$

mit

$$\Delta\sigma_{c,5\%} = 2 \cdot \Delta\sigma_{c,50\%} - \Delta\sigma_{c,95\%} \quad (3.2)$$

Spezielle, auf die Dauerfestigkeit der Versuchskörper ausgerichtete Untersuchungen wurden nicht näher durchgeführt. Ziel der Ermüdungsversuche war es lediglich, den Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit und somit den Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu ermitteln.

3.4.2 Hartes Stempeln

In [4] hat sich bereits gezeigt, dass sich für die gestempelten Versuchskörper kein signifikanter Einfluss der Streckgrenze des Grundmaterials auf das Ermüdungsverhalten erkennen lässt. Lediglich für die Versuchskörper mit einer Blechdicke von 15 mm aus S355J2 zeigten sich in der Regel höhere Lastwechselzahlen als für Versuchskörper gleicher Blechdicke aus S460N, siehe Abb. 3.9 und Abb. 3.10.

Darüber hinaus wurden auch die gestempelten Versuchskörper beider Stahlsorten zu unterschiedlichen Zeitpunkten markiert, weshalb neben den möglichen Abweichungen aus unterschiedlichen Stahlgüten auch jene aus variierenden Markierparametern berücksichtigt werden müssen. Insbesondere bei mobilen Markiergeräten, siehe Abschnitt 2.2.2, ist zudem eine bedienerabhängige Streuung der Markierungsergebnisse denkbar. Dennoch liegen auch hier die Abweichungen zwischen den Lastwechselzahlen der einzelnen Versuchskörper in einem für Ermüdungsversuche durchaus üblichen Bereich, weshalb eine gemeinsame Auswertung aller gestempelten Versuchskörper getrennt nach der Blechdicke des Grundmaterials als sinnvoll erachtet wird. Bei einer gemeinsamen Auswertung der Versuchsergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S355J2 und S460N ergeben sich, verglichen mit einer getrennten Auswertung für die Blechdicken 25 mm und 40 mm, aufgrund des stark ähnlichen Verhaltens der beiden Serien untereinander tendenziell ähnliche Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_c$. Für die gestempelten Versuchskörper der Blechdicke 15 mm ergibt sich trotz größerer Stichprobenanzahl eine niedrigere Ermüdungsfestigkeit als bei getrennter Auswertung, siehe Abb. 3.11. Dies

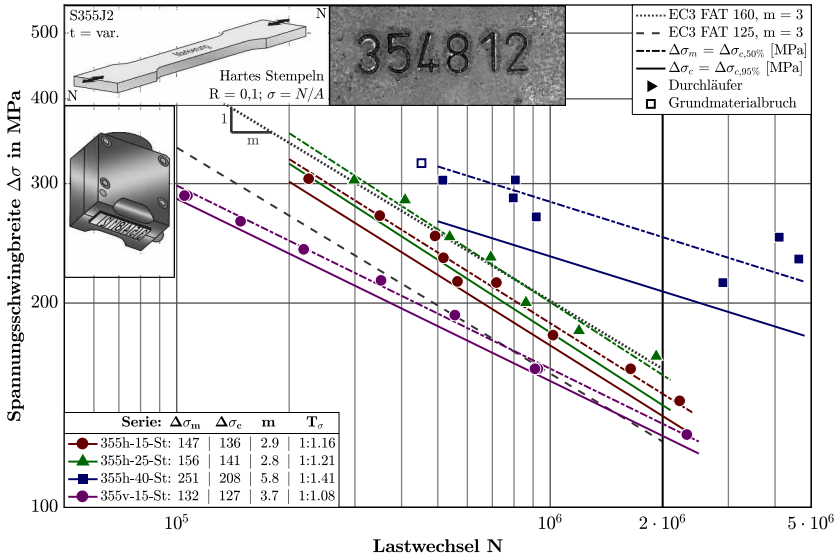


Abb. 3.9 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung

hängt jedoch vor allem damit zusammen, dass hier sowohl die Ergebnisse der *Voruntersuchungen*, mit teilweise deutlich tieferen Markierkerben, als auch die Ergebnisse der *Hauptuntersuchungen* zusammen ausgewertet werden.

Die Ergebnisse der gemeinsamen Auswertung sind als durchaus positiv zu bewerten. Die Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln ergibt sich im ungünstigsten Fall für Versuchskörper mit einer Blechdicke von 15 mm zu $\Delta\sigma_{c,95\%} = 113 \text{ N/mm}^2$. Selbst bei dieser gemeinsamen Auswertung unterschiedlicher Versuchsserien mit abweichenden Markiertiefen und -geometrien ergibt sich eine noch vergleichsweise hohe Ermüdungsfestigkeit. Mit steigender Blechdicke werden dann größer werdende Ermüdungsfestigkeiten von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 144 \text{ N/mm}^2$ bei einer Blechdicke von 25 mm und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 214 \text{ N/mm}^2$ bei einer Blechdicke von 40 mm erzielt. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit sind hier als durchaus hoch einzustufen, zumal für die Versuche bereits möglichst ungünstige Markierparameter gewählt wurden, welche in der Regel in der Praxis so nur selten angewandt werden. Ein negativer Blechdikkeneffekt lässt sich im Rahmen dieser Versuche nicht erkennen. Die Ermüdungsfestigkeit steigt hingegen mit

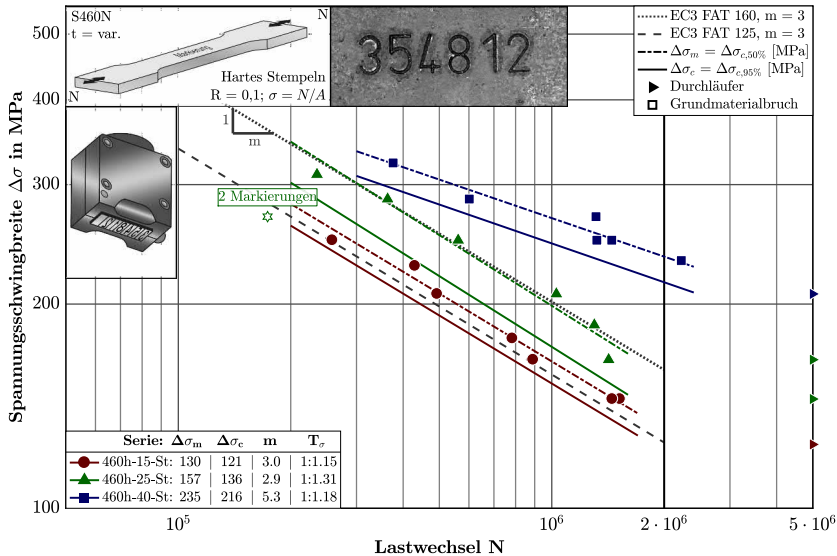


Abb. 3.10 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerlinienneigung

zunehmender Blechdicke und gleichbleibender Markiertiefe. Mögliche Ursachen hierfür werden in Abschnitt 6.2 erläutert.

Für die Versuche mit Prüfkörpern der Stahlsorte S355J2 konnten im Rahmen sowohl der *Vor-* als auch der *Hauptuntersuchungen* keine Durchläufer provoziert werden. Bis auf eine Ausnahme versagten alle Versuchskörper mit einem Riss beginnend von der Markierung. Lediglich Versuchskörper 355h-40-St-05 versagte mit einem Riss, welcher nicht von der Markierung ausging, siehe Abb. 3.12. Der Versuchskörper wurde für die statistische Auswertung nicht berücksichtigt.

Aufgrund einer doppelt aufgebrachten Markierung des Prüfkörpers 460h-25-St-06, siehe Abb. 3.13, versagte dieser bereits nach 173.388 Lastwechseln unter einer Belastung von $\Delta\sigma = 269 \text{ N/mm}^2$ und wich somit deutlich vom bis dahin ermittelten Streuband ab.

Infolge der doppelt aufgebrachten Markierung in Randnähe des Prüfkörpers ging ein erster Ermüdungsriss von dieser randnahen Markierung aus, welcher sich dann durch die mittige Markierung schneller aufweiten konnte. Der Versuchskörper wurde für die Auswertung nicht berücksichtigt.

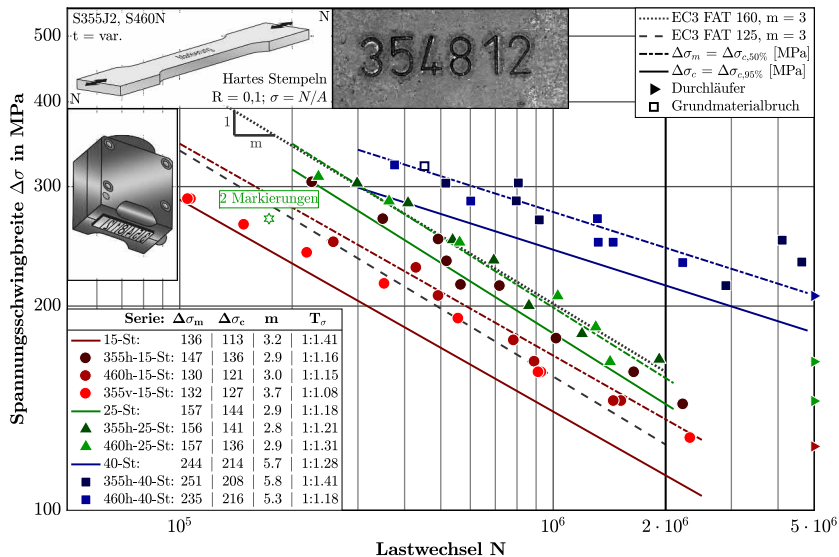


Abb. 3.11 Darstellung der gemeinsamen Auswertung beider Stahlsorten S355J2 und S460N für gestempelte Versuchskörper mit freier Wöhlerlinienneigung



Abb. 3.12 Rissausgang des Prüfkörpers 355h-40-St-05 im Grundmaterial (Übergang zwischen tailliertem und eingespanntem Bereich)



Abb. 3.13 Exemplarisches Bruchbild des Prüfkörpers 460h-25-St-06 mit doppelter Markierung

Die Risse der gestempelten Prüfkörper gingen in der Regel von der Ziffer „1“ in der Markierung aus. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Markierungen dieser Serie im Bereich der Ziffern „1“ und „2“ tiefer waren, als im restlichen Bereich. Zum anderen liefert diese Ziffer die insgesamt größte Querschnittsschwächung.

Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 355h-15-St-02 sind in Abb. 3.14 dargestellt. Anhand der Bruchbilder sind deutlich der Rissausgang von der Markierung, die vergleichsweise glatte Ermüdungsbruchfläche sowie die raue Restbruchfläche zu erkennen. Weitere Bruchbilder zu allen getesteten Serien sind in [4] zusammengefasst.

Die Ergebnisse der Ermüdungsversuche gestempelter Versuchskörper sind zudem getrennt nach Stahlsorte und Blechdicke in den Tabellen 3.7 und 3.8 dargestellt.



Abb. 3.14 Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 355h-15-St-02

Tab. 3.7 Versuchparameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S355J2

Probennr.	$\frac{\sigma_{max}}{R_{eH}}$	$\Delta\sigma$	σ_{max}	σ_{min}	LW	Bruch
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 398$ N/mm ² , $R_{eH,v} = 395$ N/mm ²						
355h-15-St-07	0,40	143,3	159,2	15,9	2.227.857	M
355h-15-St-08	0,45	159,8	177,5	17,8	1.647.016	M
355h-15-St-05	0,50	179,1	199,0	19,9	1.020.312	M
355h-15-St-04	0,60	214,9	238,8	23,9	566.220	M
355h-15-St-09	0,60	214,1	237,9	23,8	719.750	M
355h-15-St-01	0,65	232,8	258,7	25,9	519.282	M
355h-15-St-02	0,70	250,7	278,6	27,9	493.260	M
355h-15-St-03	0,75	268,7	298,5	29,9	350.662	M
355h-15-St-06	0,85	304,5	338,3	33,8	226.205	M
355v-15-St-02	0,30	107,0	96	9,6	5.000.000	D
355v-15-St-07	0,40	142,0	128	12	2.329.023	M
355v-15-St-10	0,50	178,0	160	16	913.098	M
355v-15-St-06	0,50	178,0	160	16	929.627	M
355v-15-St-05	0,60	213,0	192	19	557.230	M
355v-15-St-08	0,68	240,0	216	21	353.426	M
355v-15-St-03	0,75	266,0	240	24	219.354	M
355v-15-St-04	0,83	293,0	264	26	148.666	M
355v-15-St-09	0,90	320,0	288	28	105.163	M
355v-15-St-01	0,90	320,0	288	28	107.144	M
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 371$ N/mm ²						
355h-25-St-05	0,50	167,0	185,5	18,6	1.922.448	M
355h-25-St-07	0,55	182,1	202,4	20,2	1.194.419	M
355h-25-St-04	0,60	200,3	222,6	22,3	861.042	M
355h-25-St-01	0,70	233,7	259,7	26,0	693.284	M
355h-25-St-03	0,75	250,4	278,3	27,8	538.004	M
355h-25-St-02	0,85	283,8	315,4	31,5	408.569	M
355h-25-St-08	0,91	303,5	337,3	33,7	298.535	M
Blechdicke t = 40 mm, $R_{eH} = 397$ N/mm ²						
355h-40-St-03	0,60	214,4	238,2	23,8	2.900.000	M
355h-40-St-04	0,65	232,2	258,0	25,8	4.630.022	M
355h-40-St-07	0,70	250,1	277,9	27,8	4.103.188	M
355h-40-St-02	0,75	268,0	297,7	29,8	917.765	M
355h-40-St-06	0,80	285,8	317,6	31,8	796.402	M
355h-40-St-08	0,85	303,5	337,3	33,7	516.666	M
355h-40-St-01	0,85	303,7	337,4	33,7	806.633	M
355h-40-St-05	0,90	321,6	357,3	35,7	452.199	G
M = Rissausgang von der Markierung G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend D = Durchläufer						

Tab. 3.8 Versuchsparameter und –ergebnisse gestempelter Versuchskörper aus S460N

Probennr.	$\frac{\sigma_{max}}{R_{eH}}$	$\Delta\sigma$	σ_{max}	σ_{min}	LW	Bruch
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 502$ N/mm ²						
460h-15-St-05	0,27	124,2	138,0	13,8	5.000.000	D
460h-15-St-03	0,32	144,9	161,0	16,1	1.522.059	M
460h-15-St-08	0,32	144,9	161,0	16,1	1.452.102	M
460h-15-St-06	0,37	165,6	184,0	18,4	891.354	M
460h-15-St-01	0,39	178,0	197,8	19,8	784.210	M
460h-15-St-02	0,46	207,0	230,0	23	493.035	M
460h-15-St-07	0,50	227,7	253,0	25,3	430.038	M
460h-15-St-04	0,55	248,4	276,0	27,6	258.490	M
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 488$ N/mm ²						
460h-25-St-01	0,33	144,9	161,0	16,1	5.000.000	D
460h-25-St-03	0,47	207,0	230,0	23	1.028.608	M
460h-25-St-04	0,57	248,4	276,0	27,6	561.562	M
460h-25-St-06	0,61	269,1	299,0	29,9	173.388	2M
460h-25-St-02	0,65	285,7	317,4	31,7	363.452	M
460h-25-St-05	0,71	310,5	345,0	34,5	235.143	M
460h-25-St-06	0,71	310,5	345,0	34,5	235.143	M
460h-25-St-07	0,71	310,5	345,0	34,5	235.143	M
460h-25-St-08	0,71	310,5	345,0	34,5	235.143	M
460h-25-St-09	0,71	310,5	345,0	34,5	235.143	M
Blechdicke t = 40 mm, $R_{eH} = 530$ N/mm ²						
460h-40-St-04	0,43	207,0	230,0	23	5.000.000	D
460h-40-St-05	0,49	231,8	257,6	25,8	2.222.464	M
460h-40-St-02	0,52	248,4	276,0	27,6	1.320.146	M
460h-40-St-07	0,52	248,4	276,0	27,6	1.447.193	M
460h-40-St-06	0,56	269,1	299,0	29,9	1.313.472	M
460h-40-St-01	0,60	285,7	317,4	31,7	601.368	M
460h-40-St-03	0,68	322,9	358,8	35,9	376.012	M
M = Rissausgang von der Markierung						
D = Durchläufer						
2M = Rissausgang infolge einer doppelten Markierung						

3.4.3 Fräsen

Eine gemeinsame Auswertung der Serien 355v-Fr, 355h-Fr und 460h-Fr ist in diesem Fall nicht zielführend, da sich die Markierparameter zu stark unterscheiden und sich somit ein jeweils deutlich anderes Ermüdungsverhalten einstellt, siehe Abschnitt 4.3.2.

S355J2 Die Versuchsparameter und –ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen der gefrästen Versuchskörper aus S355J2 sind in Tabelle 3.9 zusammengefasst sowie in Abb. 3.15 in Form von Wöhlerlinien ausgewertet.

Tab. 3.9 Versuchsparameter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S355J2

Probennr.	σ_{max}/R_{eH}	$\Delta\sigma$	σ_{max}	σ_{min}	LW	Bruch
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 458$ N/mm ² , $R_{eH,v} = 395$ N/mm ²						
355h-15-Fr-08	0,50	206,1	229,0	22,9	1.944.449	M
355h-15-Fr-07	0,55	226,7	251,9	25,2	1.173.681	M
355h-15-Fr-03	0,61	251,4	279,4	27,9	894.523	M
355h-15-Fr-06	0,65	267,9	297,7	29,8	517.604	M
355h-15-Fr-05	0,70	288,5	320,6	32,1	429.336	M
355h-15-Fr-02	0,74	304,5	338,3	33,8	342.010	M
355h-15-Fr-04	0,85	350,4	389,3	38,9	206.431	M
355v-15-Fr-04	0,36	128,0	142,0	14,2	5.000.000	D
355v-15-Fr-12	0,45	160,0	178,0	17,8	1.604.257	M
355v-15-Fr-02	0,54	192,0	213,0	21,3	915.440	M
355v-15-Fr-08	0,54	192,0	213,0	21,3	914.122	M
355v-15-Fr-05	0,61	216,0	240,0	24,0	708.400	M
355v-15-Fr-09	0,61	216,0	240,0	24,0	527.644	M
355v-15-Fr-03	0,67	240,0	266,0	26,6	569.842	M
355v-15-Fr-10	0,67	240,0	266,0	26,6	492.449	M
355v-15-Fr-06	0,74	264,0	293,0	29,3	320.631	M
355v-15-Fr-11	0,74	264,0	293,0	29,3	365.550	M
355v-15-Fr-01	0,81	288,0	320,0	32,0	206.422	M
355v-15-Fr-07	0,81	288,0	320,0	32,0	278.641	M
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 393$ N/mm ²						
355h-25-Fr-01	0,60	212,2	235,8	23,6	2.600.000	F
355h-25-Fr-05	0,70	247,6	275,1	27,5	982.791	M
355h-25-Fr-06	0,75	265,3	294,7	29,5	652.684	M
355h-25-Fr-03	0,80	283,0	314,4	31,4	480.395	M
355h-25-Fr-04	0,85	300,6	334,0	33,4	315.463	M
355h-25-Fr-02	0,90	318,3	353,7	35,4	166.406	M
Blechdicke t = 40 mm, $R_{eH} = 415$ N/mm ²						
355h-40-Fr-04	0,70	261,5	290,5	29,1	1.797.976	M
355h-40-Fr-07	0,73	271,6	301,7	30,2	1.448.410	M
355h-40-Fr-05	0,75	281,2	312,4	31,2	1.179.745	M
355h-40-Fr-03	0,79	295,7	328,5	32,9	679.192	M
355h-40-Fr-06	0,80	297,1	330,1	33	900.889	M
355h-40-Fr-08	0,81	303,5	337,3	33,7	892.193	M
355h-40-Fr-01	0,85	317,5	352,7	35,3	727.396	M
M = Rissausgang von der Markierung D = Durchläufer F = Fehler in Messdatenerfassung; 2,5 Mio. < N < 2,7 Mio.						

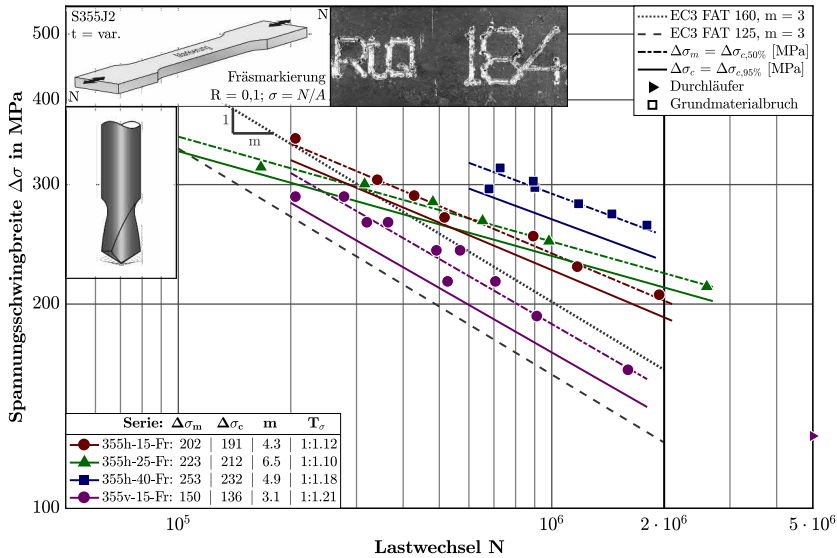


Abb. 3.15 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung

Die erzielten Ermüdungsfestigkeiten liegen für diese Serie zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 136 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper aus *Voruntersuchungen* der Blechdicke 15 mm (violette Volllinie) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 232 \text{ N/mm}^2$ für die 40 mm dicken Prüfkörper (blaue Volllinie). Im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* wurden Ermüdungsfestigkeiten von mindestens $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ erzielt. Diese im Vergleich zu den Prüferien gestempelter Versuchskörper hohen Ermüdungsfestigkeiten resultieren aus den geringen Markiertiefen von ca. $300 \mu\text{m}$, siehe Abschnitt 4.3.2. Mit einer Ausnahme ließen sich für die gefrästen Versuchskörper keine Durchläufer provozieren. Lediglich Versuchskörper 355v-15-Fr-04 zeigte bei einer vergleichsweise kleinen Spannungsschwingbreite von $\Delta\sigma = 128 \text{ N/mm}^2$ kein Versagen bis zu einer Lastwechselzahl von fünf Millionen. Dies ist insofern interessant, als dass die Markiertiefe der Versuchskörper als gering einzustufen ist und so besonders für geringe Lastniveaus durchaus bei höheren Spannungsschwingbreiten Durchläufer zu erwarten gewesen wären. Die Streuungen sind mit Streumaßen T_σ zwischen 1:1,12 und 1:1,21 als gering einzustufen.

Exemplarische Bruchbilder der Prüfkörper 355h-40-Fr-01 und 355h-40-Fr-04 sind in Abb. 3.16 dargestellt. Bei den Bruchbildern des Prüfkörpers 355h-40-Fr-01

(links) fällt die im Verhältnis zur Restbruchfläche relativ kleine Ermüdungsbruchfläche auf. Diese ist auf die hohe Belastung mit einer Oberspannung von 85 % der gemessenen Streckgrenze zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist die Ermüdungsbruchfläche für Prüfkörper 355h-40-Fr-04 (rechts) aufgrund der geringeren Belastung mit einer Oberspannung von 70 % der Streckgrenze deutlich größer.



Abb. 3.16 Exemplarische Bruchbilder der gefrästen Prüfkörper 355h-40-Fr-01 mit $\Delta\sigma = 317,5 \text{ N/mm}^2$ (links) und 355h-40-Fr-04 mit $\Delta\sigma = 261,5 \text{ N/mm}^2$ (rechts)

S460N Die Versuchsparameter und -ergebnisse der Ermüdungsversuche der gefrästen Versuchskörper aus S460N sind in Tabelle 3.10 dargestellt. Die Auswertung der Versuche in Form von Wöhlerlinien ist in Abb. 3.17 abgebildet.

Die Ermüdungsfestigkeiten der drei Serien mit Blechdicken von 15 mm, 25 mm und 40 mm liegen zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 130 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper der Blechdicke 25 mm (grüne Volllinie) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 173 \text{ N/mm}^2$ für die Versuchskörper der Blechdicke 40 mm. Die Ermüdungsfestigkeit der 15 mm dicken Prüfkörper liegt mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 154 \text{ N/mm}^2$ in der Mitte der drei Serien. Alle geprüften Versuchskörper versagten durch einen Ermüdungsriß ausgehend von der gefrästen Markierung.

Die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der gefrästen Versuchskörper aus S355J2 ist aufgrund der unterschiedlichen Markierparameter erschwert. Dennoch wird

Tab. 3.10 Versuchsparameter und –ergebnisse gefräster Versuchskörper aus S460N

Probennr.	σ_{max}/R_{eH}	$\Delta\sigma$	σ_{max}	σ_{min}	LW	Bruch
		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²		
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 502$ N/mm ²						
460h-15-Fr-06	0,46	207,0	230,0	23,0	933.130	M
460h-15-Fr-02	0,50	227,7	253,0	25,3	780.852	M
460h-15-Fr-03	0,55	248,4	276,0	27,6	431.570	M
460h-15-Fr-04	0,60	269,1	299,0	29,9	384.376	M
460h-15-Fr-01	0,64	289,8	322,0	32,2	227.060	M
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 488$ N/mm ²						
460h-25-Fr-10	0,38	165,6	184,0	18,4	1.450.737	M
460h-25-Fr-09	0,42	186,3	207,0	20,7	1.100.734	M
460h-25-Fr-05	0,47	207,0	230,0	23,0	1.175.885	M
460h-25-Fr-08	0,52	227,7	253,0	25,3	436.222	M
460h-25-Fr-04	0,57	248,4	276,0	27,6	422.099	M
460h-25-Fr-07	0,57	248,4	276,0	27,6	350.845	M
460h-25-Fr-06	0,61	269,1	299,0	29,9	318.317	M
460h-25-Fr-03	0,61	269,1	299,0	29,9	501.181	M
460h-25-Fr-01	0,66	289,8	322,0	32,2	249.242	M
460h-25-Fr-02	0,71	310,5	345,0	34,5	200.507	M
Blechdicke t = 40 mm, $R_{eH} = 530$ N/mm ²						
460h-40-Fr-05	0,39	186,3	207,0	20,7	1.730.688	M
460h-40-Fr-04	0,52	248,4	276,0	27,6	509.644	M
460h-40-Fr-03	0,56	269,1	299,0	29,9	383.829	M
460h-40-Fr-06	0,61	289,8	322,0	32,2	302.583	M
460h-40-Fr-02	0,65	310,5	345,0	34,5	229.591	M
460h-40-Fr-01	0,74	351,9	391,0	39,1	129.891	M
M = Rissaussgang von der Markierung						

deutlich, dass bei einer Markierung mit gleichen Werkzeugen und unterschiedlichen Markierparametern der Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit stark variieren kann. So weisen die gefrästen Versuchskörper aus S355J2 mit einer Dicke von 15 mm eine vergleichbar hohe Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191$ N/mm² auf, wie die gefrästen Versuchskörper aus S460N mit einer Dicke von 40 mm und einer Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 173$ N/mm². Hervorzuheben ist weiterhin die geringe Streuung der Versuchsergebnisse der 40 mm dicken Prüfkörper mit einem Streumaß $T_\sigma = 1:1,07$, welches auch visuell durch den geringen Abstand der Wöhlerlinien $\Delta\sigma_{c,95\%}$ und $\Delta\sigma_{c,50\%}$ in Abb. 3.17 zu erkennen ist. Die Streuung der Prüfkörper mit Nenndicken von 15 mm und 25 mm ist dagegen mit Streumaßen von $T_\sigma = 1:1,29$ und $T_\sigma = 1:1,38$ deutlich größer. Diese größeren Abweichungen sind einer vergleichbar kleinen untersuchten Stichprobe mit einzelnen Ausreißerversuchen geschuldet, weshalb auch diese Streuungen unter

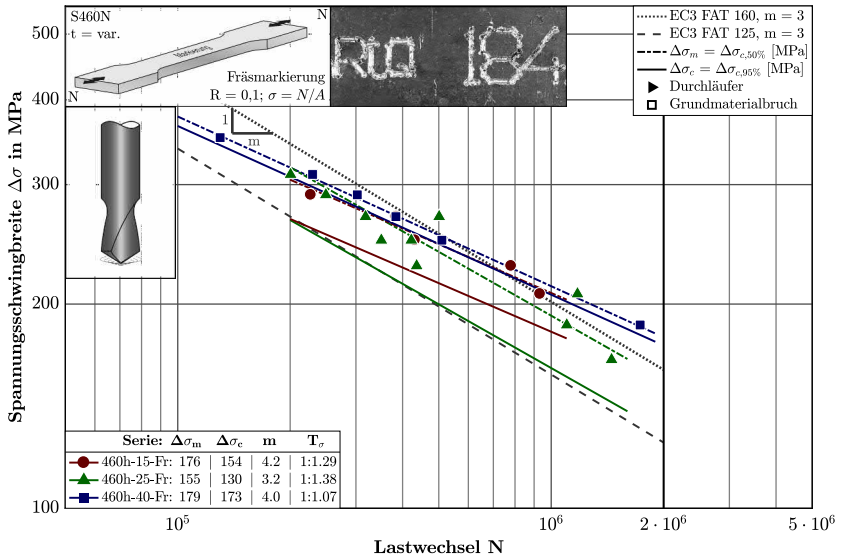


Abb. 3.17 Ergebnisse der Ermüdungsversuche gefräster Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerrinnenneigung

Vernachlässigung der Ausreißer deutlich kleiner ausfallen würden. Dennoch liegen die Streuungen in einem für Ermüdungsversuche durchaus üblichen Bereich.

Exemplarische Bruchbilder des Prüfkörpers 460h-25-Fr-01 sind in Abb. 3.18 dargestellt. Die Bruchfläche sowie das Bruchbild zeigen deutlich den Rissaufgang von der Markierung.

3.4.4 Plasmamarkieren

Die plasmamarkierten Versuchskörper zeigen in Summe das unbeständigste Verhalten innerhalb der untersuchten Serien. Zum einen sind die Streuungen der Einzelergebnisse vom jeweiligen Mittelwert gegenüber den gefrästen und gestempelten Versuchskörpern größer, zum anderen werden, insbesondere bei den Versuchsserien mit Prüfkörpern der Stahlsorte S355J2, die meisten Durchläufer erzielt. Aufgrund des zusätzlich teilweise unterschiedlichen Verhaltens der Versuchskörper der Stahlsorten S355J2 und S460N wird eine gemeinsame Auswertung als nicht sinnvoll erachtet. Die im Rahmen der *Voruntersuchungen* mit unterschiedlichen Stromstärken hergestellten Versuchskörper wurden auf einem



Abb. 3.18 Exemplarische Darstellung der Bruchbilder des gefrästen Prüfkörpers 460h-25-Fr-01

Lasthorizont geprüft. Wie zu erwarten sinkt bei diesen Serien mit zunehmender Stromstärke und somit auch zunehmender Markiertiefe die Ermüdungsfestigkeit.

S235JR und S355J2 Die Ergebnisse der plasamarkierten Versuchskörper aus S355J2 sind in Abb. 3.19 sowie in den Tabellen 3.11 und 3.12 dargestellt.

Im Vergleich zu den gefrästen und gestempelten Versuchskörpern wurden für die plasamarkierten Versuchskörper aus S355J2 die meisten Durchläufer erzielt. Die Ermüdungsfestigkeiten für die 15 mm und 25 mm dicken Prüfkörper liegen bei $\Delta\sigma_{c,95\%} = 145 \text{ N/mm}^2$ und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (rote und grüne Volllinie).

Die Versuchskörper mit einer Blechdicke von 40 mm zeigten bereits in [4] ein nicht nachvollziehbares Verhalten, so dass sich eine Wöhlerlinie nicht sinnvoll ermitteln ließ, siehe Abb. 3.19. Eine Erklärung konnte in [4] nicht gefunden werden, weshalb weitere Ermüdungsversuche dieser Serie durchgeführt wurden. Die weiteren Versuche 355h-40-Pl-08 und 355h-40-Pl-09 zeigten jedoch ebenso ein Verhalten bei Ermüdungsbelastung, welches die Ermittlung einer sinnvollen Wöhlerlinie nicht zulässt. Bereits bei einer hohen Oberspannung von 75 % der Streckgrenze R_{eH} nach APZ 3.1 wird ein Durchläufer erzielt. Bei einer nur unwesentlich

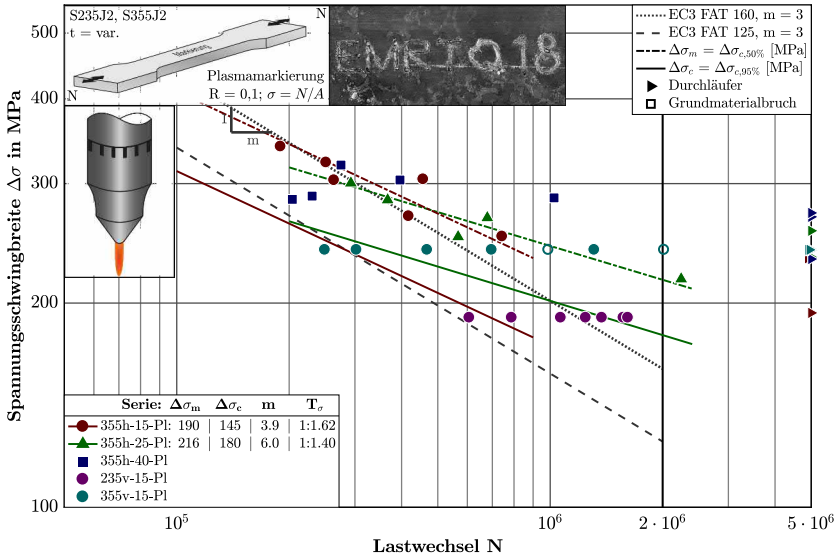


Abb. 3.19 Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorten S235JR und S355J2 mit freier Wöhlerlinienneigung

größeren Beanspruchung von 80 % R_{eH} werden lediglich Lastwechselzahlen von ca. 204.000 bis 1.024.000 erzielt, bei denen der Ermüdungsriß im Prüfkörper von der Markierung ausgeht. In bisherigen Untersuchungen konnte dieses große Streuband nicht umfänglich erklärt werden. Eine mögliche Ursache sind ungleichmäßige Kennzeichnungstiefen innerhalb der Serie in Verbindung mit einem ohnehin geringen Einfluss der Plasmamarkierung.

Diese Möglichkeit wird als durchaus wahrscheinlich betrachtet, da alle plasmamarkierten Versuchskörper der *Hauptuntersuchungen* mit einer Stahlgüte S355J2 in einem Arbeitsgang markiert wurden und die vergleichsweise großen Streuungen innerhalb dieser Serien durchgängig auftreten. Nichtsdestotrotz lassen sich für die Versuchsserien 355h-15-Pl und 355h-25-Pl immerhin Wöhlerlinien ermitteln. Eine gezieltere Aussage ließe sich über eine umfängliche Vermessung aller Kennzeichnungskerben realisieren, wobei zu beachten ist, dass die Streuungen der Versuchsergebnisse realen Markierungen geschuldet sind, die so in der Praxis ebenfalls vorkommen. Betrachtet man die erzielten Ergebnisse und Durchläufer kann daher angenommen werden, dass eine Dauerfestigkeit im Bereich um $\Delta\sigma_{e,95\%} = 230 \text{ N/mm}^2$ erreicht werden kann.

Tab. 3.11 Versuchsparameter und -ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S235JR und S355J2

Probennr.	Amp.	$\frac{s}{m/min}$	σ_{max}/R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{N/mm^2}$	LW	Bruch
S235 — t = 15 mm — $R_{eH} = 271 \text{ N/mm}^2$						
235v-15-Pl-07	5	3,81	0,78	190,4	1.614.782	M
235v-15-Pl-06	8	6,35	0,78	190,4	1.570.360	M
235v-15-Pl-05	8	3,81	0,78	190,4	1.375.604	M
235v-15-Pl-04	10	6,35	0,78	190,4	622.472	M
235v-15-Pl-03	11	6,35	0,78	190,4	1.067.457	M
235v-15-Pl-02	13	3,81	0,78	190,4	788.707	M
235v-15-Pl-01	15	6,35	0,78	190,4	607.203	M
S355 — t = 15 mm — $R_{eH} = 398 \text{ N/mm}^2$						
355h-15-Pl-03	10	6,1	0,54	193,4	5.000.000	D
355h-15-Pl-05	10	6,1	0,65	232,8	5.000.000	D
355h-15-Pl-08	10	6,1	0,70	250,7	743.505	M
355h-15-Pl-04	10	6,1	0,75	268,7	417.800	M
355h-15-Pl-09	10	6,1	0,85	303,5	263.742	M
355h-15-Pl-02	10	6,1	0,85	304,5	457.020	M
355h-15-Pl-06	10	6,1	0,90	322,4	251.126	M
355h-15-Pl-07	10	6,1	0,95	340,3	189.654	M
S355 — t = 25 mm — $R_{eH} = 371 \text{ N/mm}^2$						
355h-25-Pl-02	10	6,1	0,65	217,0	2.242.320	M
355h-25-Pl-06	10	6,1	0,70	233,7	5.000.000	D
355h-25-Pl-04	10	6,1	0,75	250,4	566.817	M
355h-25-Pl-08	10	6,1	0,77	255,6	5.000.000	D
355h-25-Pl-07	10	6,1	0,80	267,1	678.597	M
355h-25-Pl-03	10	6,1	0,85	283,8	367.069	M
355h-25-Pl-05	10	6,1	0,90	300,5	292.625	M
S355 — t = 40 mm — $R_{eH} = 397 \text{ N/mm}^2$						
355h-40-Pl-02	10	6,1	0,65	232,2	5.000.000	D
355h-40-Pl-06	10	6,1	0,75	268,0	5.000.000	D
355h-40-Pl-05	10	6,1	0,80	285,8	1.024.000	M
355h-40-Pl-07	10	6,1	0,80	284,4	203.953	M
355h-40-Pl-09	10	6,1	0,80	287,6	230.443	M
355h-40-Pl-04	10	6,1	0,85	303,7	396.080	M
355h-40-Pl-08	10	6,1	0,89	319,5	275.281	M
355h-40-Pl-10	10	6,1	0,76	271,6	5.000.000	D
M = Rissausgang von der Markierung						
D = Durchläufer						

Weiterhin möglich wären Inhomogenitäten oder Einschlüsse im Grundmaterial, welche sich in stark streuenden Bruchlastwechselahlen niederschlagen. So zeigen Prüfkörper der Blechdicke von t = 40 mm mit geringen Bruchlastwechselzahlen in der Bruchfläche Anrisse parallel zur Blechebene im Übergang zwischen der Ermüdungs- und Restbruchfläche, siehe Abb. 3.20. Diese Anrisse treten lediglich bei den plasmamarkierten Prüfkörpern der Stahlsorte S355J2 und der

Tab. 3.12 Versuchssparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper der Serie 355v-15-Pl

Nr.	min. Amp.	max. Amp.	Ø Amp.	σ_{max}/R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{N/mm^2}$	LW	Bruch ^d
Längs ^a — t = 15 mm — $R_{eH} = 385 \text{ N/mm}^2$							
355v-15-Pl-05	4	15	9,5			5.000.000	D
355v-15-Pl-04	7	17	12			5.065.775	D
355v-15-Pl-03	10	20	15	0,69	239,6	1.311.997	M
355v-15-Pl-02	12	22	17			697.084	M
355v-15-Pl-01	15	25	20			249.213	M
Quer ^b — t = 15 mm — $R_{eH} = 385 \text{ N/mm}^2$							
355v-15-Pl-10	4	15	9,5			2.017.500	G
355v-15-Pl-09	7	17	12			988.419	G
355v-15-Pl-08	10	20	15	0,69	239,6	6.011.567 ^c	D
355v-15-Pl-07	12	22	17			468.273	M
355v-15-Pl-06	15	25	20			302.870	M

^a Längs zur Walzrichtung des Materials markiert
^b Quer zur Walzrichtung des Materials markiert
^c fehlerhaft eingestellte Grenze. Daher LW > 5 Mio.
^d M = Rissausgang von der Markierung, D = Durchläufer, G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend

Blechdicke t = 40 mm auf, obwohl auch die Prüfkörper mit Stempel- und Nadelmarkierungen aus der gleichen Schmelze hergestellt wurden. Möglicherweise wird durch diese Anrisse der Rissfortschritt beschleunigt, sodass teilweise reduzierte Bruchlastwechselzahlen resultieren.

Die Bruchbilder der beiden Prüfkörper 355h-40-Pl-05 (1.024.000 LW) und 355h-40-Pl-07 (203.953 LW) sind in Abb. 3.20 dargestellt.

Die Restbruchfläche des Versuchskörpers 355h-40-Pl-05 (rechts), dem Prüfkörper mit 1.024.000 Lastwechseln, ist deutlich kleiner als bei Versuchskörper 355h-40-Pl-07. Dies deutet auf eine längere stabile Risswachstumsphase hin. Der Grund für die höheren Bruchlastwechselzahlen des Prüfkörpers 355h-40-Pl-07 konnte nicht geklärt werden.

Zudem ist zu beachten, dass zwar die plasmamarkierten Prüfkörper der Stahlsorte S355J2 und der Blechdicken 15 mm und 25 mm vergleichsweise geringe Ermüdungsfestigkeiten erzielen, welche sich aber auf die kleine Stichprobenanzahl und vorhandene Ausreißer zurückführen lassen. So liegen bereits die Werte T_σ für die Serie 355h-25-Pl bei 1:1,40 und für die Prüfserie 355h-15-Pl bei 1:1,62. Betrachtet man die Mittelwerte der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_m$ in Zusammenhang mit den Einzelergebnissen der Ermüdungsversuche, wird deutlich, dass

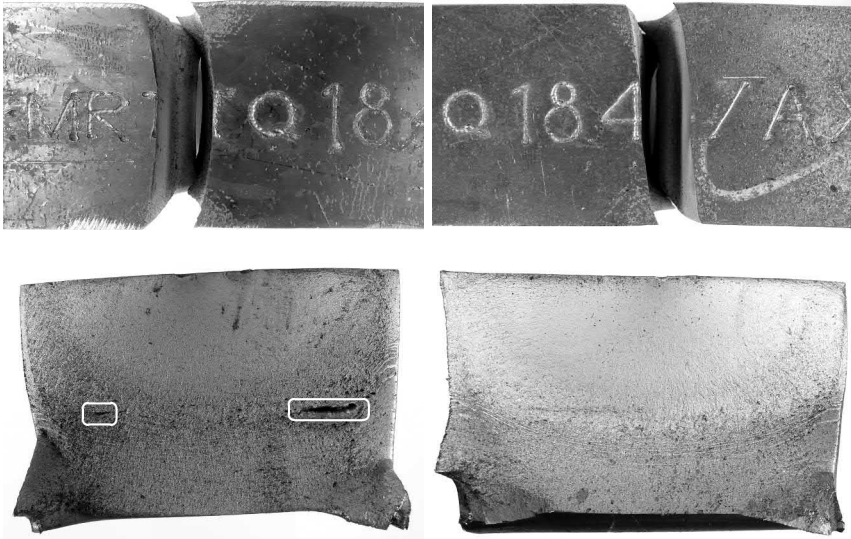


Abb. 3.20 Exemplarische Bruchbilder der plasmamarkierten Prüfkörper 355h-40-Pl-07 (links) und 355h-40-Pl-05 (rechts)

die Ermüdungsfestigkeit ohne die große Streuung der Ergebnisse deutlich höher läge. Aufgrund der statistischen Auswertung wird die 95 %-Fraktile allerdings in beiden Fällen stark reduziert.

Die Versuchsserie 235v-15-Pl mit unterschiedlich stark markierten Prüfkörpern zeigte während der Versuchsdurchführung mit einer Ausnahme keine Auffälligkeiten. Generell lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Stromstärke und somit zunehmender Markiertiefe die Ermüdungsfestigkeit sinkt. Lediglich Versuchskörper 235v-15-Pl-04 ist hier als Ausreißer zu werten. Die Bruchlastwechselzahl liegt nur bei knapp der Hälfte der erwartbaren Lastwechsel. Hier liegt ein Fehler in der Lastwechselzählung nahe, welcher allerdings nicht mit Sicherheit bestätigt werden kann.

Auch die Versuchskörper der Serie 355v-15-Pl wurden einerseits mit unterschiedlichen Stromstärken markiert, andererseits aber wurde die Hälfte der Versuchskörper längs zur Walzrichtung markiert, die andere Hälfte quer zur Walzrichtung. Die längs zur Walzrichtung markierten Versuchskörper zeigten, dass mit abnehmender Stromstärke deutlich größere Lastwechselzahlen resultieren.

Während die Markierung des Versuchskörpers 355v-15-Pl-01 (15 A) gut zu erkennen ist, lässt sich die Markierung des Versuchskörpers 355v-15-Pl-05 (4 A) mit bloßem Auge nur erahnen, siehe auch Abb. 3.21.



Abb. 3.21 Bruchbilder der Versuchskörper 355v-15-Pl-09 (links) und 355v-15-Pl-10 (rechts)

Einige Unregelmäßigkeiten innerhalb der Versuchsergebnisse zeigten sich bei den quer zur Walzrichtung markierten Versuchskörpern. Bei den Versuchskörpern 355v-15-Pl-09 (7 A) und 355v-15-Pl-10 (4 A), beide mit relativ schwacher Stromstärke markiert, versagten die Proben im Bereich der Ausrundung zwischen Einspannbereich und verjüngter Markierzone, wie in Abb. 3.21 zu erkennen ist. In diesem Bereich unterliegt die Geometrie fertigungsbedingt den größten Streuungen. Darüber hinaus reichte die Plasmamarkierung dieser Serie bis in den Übergangsbereich. Dies erklärt, warum im Laufe der Ermüdungsversuche dieser Prüfkörper im Vergleich zu den längs zur Walzrichtung markierten Versuchskörpern keine Durchläufer erzeugt werden konnten. In Abb. 3.21 ist des Weiteren zu erkennen, dass der Rissausgang des Prüfkörpers 355v-15-Pl-09 nicht von der Plasmamarkierung, sondern von einer Fehlstelle im Material ausgegangen ist. Der Riss des Versuchskörpers 355v-15-Pl-10 ist ebenfalls vom Grundmaterial ausgegangen. Für diese beiden Versuche lässt sich somit keine konkrete Aussage über den Einfluss der Ermüdungsfestigkeit infolge der Plasmamarkierung treffen, außer, dass mit der Markierung mindestens die angegebenen Lastwechsel erreicht wurden. Da bereits der Versuchskörper 355v-15-Pl-08 (10 A) als Durchläufer eingestuft werden konnte, kann die Annahme getroffen werden, dass auch die

Prüfkörper 355v-15-Pl-09 und 355v-15-Pl-10 fünf Millionen Schwingspiele infolge der Plasmamarkierung hätten erreichen können.

S460N Die Ergebnisse der plasmamarkierten Versuchskörper aus S460N zeigen deutlich geringere Streuungen als die vergleichbaren Versuchskörper der Stahlsorte S355J2. Die Streuungen der Ergebnisse sind mit Werten von $T_\sigma = 1:1,17$ für die Versuchskörper der Dicke 40 mm, $T_\sigma = 1:1,21$ (15 mm) sowie $T_\sigma = 1:1,26$ (25 mm) kleiner als bei vergleichbaren plasmamarkierten Serien aus S355J2.

Die in Abb. 3.22 in Form von Wöhlerlinien ausgewerteten und in Tabelle 3.13 dargestellten Ergebnisse liefern Ermüdungsfestigkeiten von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 135 \text{ N/mm}^2$ für Proben der Blechdicke 15 mm (rote Volllinie) bis $\Delta\sigma_{c,95\%} = 143 \text{ N/mm}^2$ für Versuchskörper der Dicke 40 mm (blaue Volllinie). Lediglich für zwei Versuchskörper der Blechdicke 40 mm konnten Durchläufer erzeugt werden, alle weiteren Versuchskörper versagten mit einem Riss ausgehend von der Plasmamarkierung. Die Ermüdungsfestigkeit der 25 mm dicken Prüfkörper liegt mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 138 \text{ N/mm}^2$ zwischen diesen Werten.

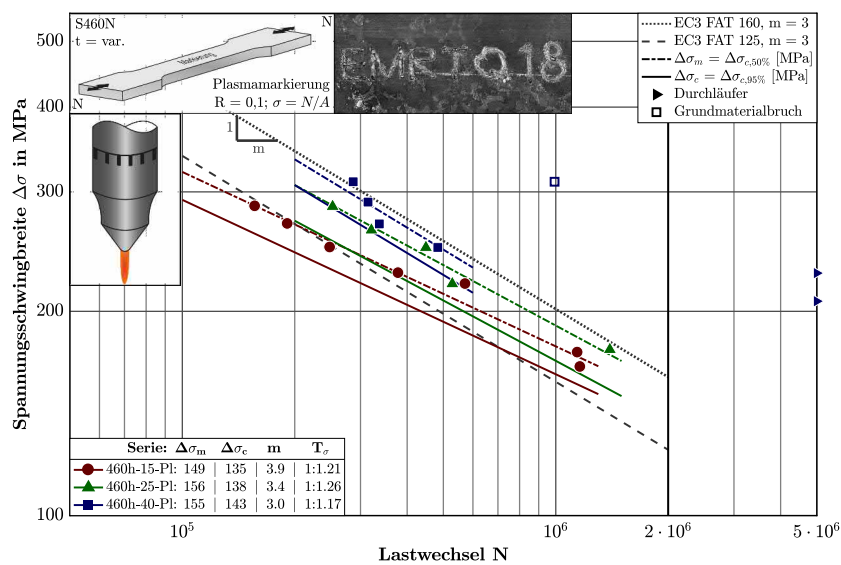


Abb. 3.22 Ergebnisse der Ermüdungsversuche plasmamarkierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N mit freier Wöhlerlinienneigung für Versuchskörper der Blechdicken 15 mm und 25 mm

Tab. 3.13 Versuchsparameter und –ergebnisse plasmamarkierter Versuchskörper aus S460N

Probennr.	σ_{max}/R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{\text{N/mm}^2}$	$\frac{\sigma_{max}}{\text{N/mm}^2}$	$\frac{\sigma_{min}}{\text{N/mm}^2}$	LW	Bruch
Blechdicke t = 15 mm, $R_{eH} = 502 \text{ N/mm}^2$						
460h-15-Pl-08	0,32	144,9	161,0	16,1	5.000.000	D
460h-15-Pl-05	0,37	165,6	184,0	18,4	1.163.433	M
460h-15-Pl-03	0,38	173,9	193,2	19,3	1.144.117	M
460h-15-Pl-04	0,49	219,4	243,8	24,4	573.029	M
460h-15-Pl-06	0,50	227,7	253,0	25,3	378.993	M
460h-15-Pl-02	0,55	248,4	276,0	27,6	248.725	M
460h-15-Pl-07	0,60	269,1	299,0	29,9	191.449	M
460h-15-Pl-01	0,63	285,7	317,4	31,7	156.639	M
Blechdicke t = 25 mm, $R_{eH} = 488 \text{ N/mm}^2$						
460h-25-Pl-04	0,40	175,7	195,2	19,5	1.395.568	M
460h-25-Pl-08	0,47	207,0	230,0	23,0	874.772	M
460h-25-Pl-03	0,50	219,6	244,0	24,4	528.378	M
460h-25-Pl-05	0,57	248,4	276,0	27,6	449.007	M
460h-25-Pl-02	0,60	263,5	292,8	29,3	320.844	M
460h-25-Pl-01	0,65	285,5	317,2	31,7	252.612	M
Blechdicke t = 40 mm, $R_{eH} = 530 \text{ N/mm}^2$						
460h-40-Pl-03	0,43	207,0	230,0	23	5.000.000	D
460h-40-Pl-04	0,48	227,7	253,0	25,3	5.000.000	D
460h-40-Pl-05	0,52	248,4	276,0	27,6	483.174	M
460h-40-Pl-02	0,56	269,1	299,0	29,9	336.949	M
460h-40-Pl-01	0,61	289,8	322,0	32,2	314.246	M
460h-40-Pl-06	0,65	310,5	345,0	34,5	992.551	G
460h-40-Pl-07	0,65	310,5	345,0	34,5	286.764	M
460h-40-Pl-08	0,69	331,2	368,0	36,8	5.000.000	D
M = Rissausgang von der Markierung						
D = Durchläufer						
G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend						

Aufgrund der vorhandenen verwertbaren Probenanzahl der Prüfkörper mit einer Blechdicke von 40 mm war eine Auswertung der Wöhlerlinie mit einer variablen Neigung nicht sinnvoll, weshalb diese Serie mit einer vorgegebenen Wöhlerlinieneigung von $m = 3,0$ ausgewertet wurde. Zudem ist davon auszugehen, dass die Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 143 \text{ N/mm}^2$ sehr konservativ bestimmt ist. Zwei der sieben getesteten Versuchskörper waren Durchläufer. Diese beiden Durchläufer 460h-40-Pl-03 und 460h-40-Pl-04 wurden mit einer relativ geringen Oberspannung von 43 % bzw. 48 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 getestet. Es kann daher angenommen werden, dass in diesem Bereich die Dauerfestigkeit des untersuchten Details liegt. Zwar wurden hinsichtlich der Dauerfestigkeit keine expliziten Untersuchungen durchgeführt, allerdings wird durch eine Extrapolation der Wöhlerlinie auf zwei Millionen Lastwechsel die

Ermüdungsfestigkeit zu niedrig abgeschätzt. In einem ersten Schritt wird hier eine Dauerfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 207 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Eine exakte Bestimmung der Dauerfestigkeit wäre in Zukunft durch weitere Untersuchungen realisierbar, welche nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

Versuchskörper 460h-40-Pl-06 versagte bei einer Ermüdungsbeanspruchung in Höhe von $\Delta\sigma = 310 \text{ N/mm}^2$ nach 992.551 Lastwechseln im Grundmaterial mit einem Rissausgang in der Ausrundung des Prüfkörpers, siehe Abb. 3.23.



Abb. 3.23 Exemplarische Bruchbilder des plasmamarkierten Prüfkörpers 460h-40-Pl-06 mit Rissausgang im Grundmaterial

3.4.5 Nadeln

Die Ergebnisse der genadelten Versuchskörper zeigen ein ausgesprochen gutmütiges Ermüdungsverhalten. In Summe aller Versuche konnte lediglich bei zwei von 16 untersuchten Prüfkörpern überhaupt ein Versagen provoziert werden, welches von einer der Markierungen ausging. Ein entsprechendes Bruchbild einer dieser Versuchskörper aus den *Voruntersuchungen* ist Abb. 3.24 zu entnehmen. Im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* versagten die je zwei getesteten Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und S460N mit Blechdicken von jeweils 15 und 25 mm entweder im Grundmaterial oder konnten als Durchläufer deklariert werden, obwohl sie durch verhältnismäßig hohe Ermüdungsbeanspruchungen $\Delta\sigma = 283\text{--}319 \text{ N/mm}^2$ belastet wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.14 und Abb. 3.25 dargestellt. Die hohen ertragbaren Lastwechselzahlen bei den ebenso hohen Spannungsschwingbreiten lassen den Schluss zu, dass die hier untersuchten Nadelmarkierungen nahezu keinen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit haben,

obwohl im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* bereits möglichst ungünstige Parameter betrachtet wurden.

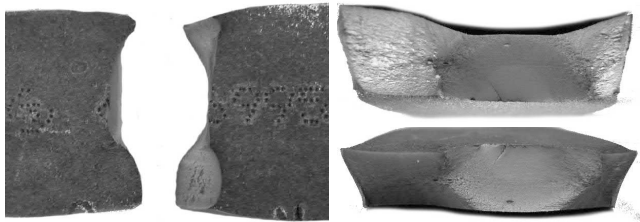


Abb. 3.24 Bruchbild (links) und Bruchflächen (rechts) der mittels Nadelmarkierung markierten Stahlprobe 460v-15-Na-01

Tab. 3.14 Versuchsparameter und –ergebnisse genadelter Versuchskörper

Probennr.	σ_{max}/R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{\text{N/mm}^2}$	$\frac{\sigma_{max}}{\text{N/mm}^2}$	$\frac{\sigma_{min}}{\text{N/mm}^2}$	LW	Bruch
S355 — t = 15 mm — $R_{eH} = 398 \text{ N/mm}^2$						
355h-15-Na-01	0,89	319,5	355,0	35,5	1.275.596	G
355h-15-Na-02	0,89	319,5	355,0	35,5	858.630	G
S355 — t = 25 mm — $R_{eH} = 371 \text{ N/mm}^2$						
355h-25-Na-01	0,85	283,8	315,4	31,5	5.000.000	D
355h-25-Na-02	0,96	319,5	355,0	35,5	723.095	G
S355 — t = 30 mm — $R_{eH} = 425 \text{ N/mm}^2$						
355v-30-Na-01	0,50	190,4	211,5	21,2	5.000.000	D
S460 — t = 15 mm — $R_{eH} = 502 \text{ N/mm}^2$, $R_{eH,v} = 486 \text{ N/mm}^2$						
460h-15-Na-01	0,73	318,8	355,0	35,5	563.659	G
460h-15-Na-03	0,73	318,8	355,0	35,5	690.306	G
460v-15-Na-02	0,80	331,2	368	36,8	5.000.000	D
460v-15-Na-01	0,90	373,6	414	41,4	300.620	M
S460 — t = 25 mm — $R_{eH} = 488 \text{ N/mm}^2$						
460h-25-Na-01	0,73	318,8	315,4	31,5	554.532	G
460h-25-Na-02	0,73	318,8	355,0	35,5	425.570	G
S235 — t = var. — $R_{eH} = \text{var.}$						
235v-Na-01	0,67	190,4	211,5	21,1	5.000.000	D
235v-Na-02	0,90	256,0	284,4	28,4	5.000.000	D
235v-Na-06	0,75	190,4	211,5	21,1	5.000.000	D
235v-Na-09	0,68	190,4	211,5	21,1	5.000.000	D
235v-Na-07	0,90	251,1	279,0	27,9	557.602	M
M = Rissausgang von der Markierung						
D = Durchläufer						
G = Rissausgang im Grundmaterial, nicht von der Markierung ausgehend						

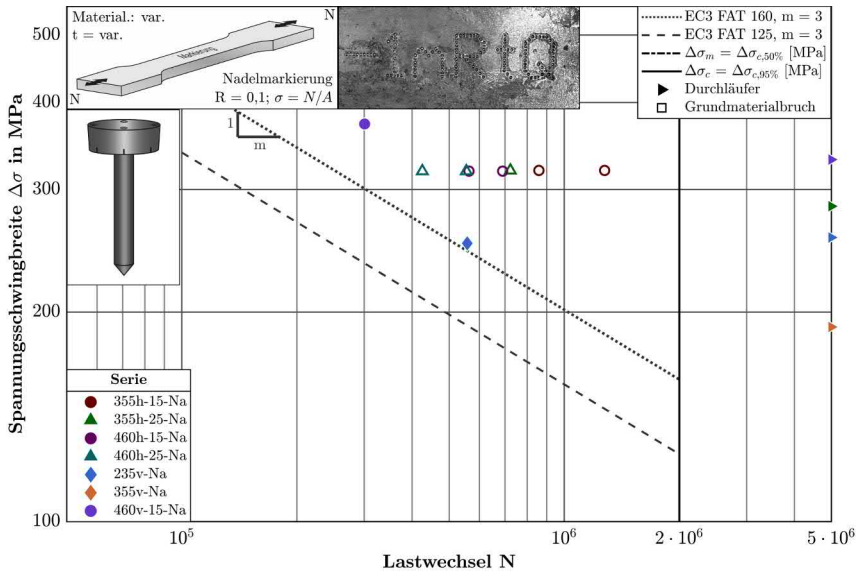


Abb. 3.25 Ergebnisse der Ermüdungsversuche aller nadelmarkierten Versuchskörper

3.5 Zusammenfassende Erläuterungen

Im Rahmen von Ermüdungsversuchen wurde der Einfluss der vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln auf die Ermüdungsfestigkeit von Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2 und S460N und der Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht.

Die erzielten Bruchlastwechselzahlen zeigen einen deutlichen Einfluss der drei Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren auf die Ermüdungsfestigkeit der getesteten Versuchskörper. Für die untersuchten Versuchskörper mit genadelten Markierungen konnte hingegen nahezu kein Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Diese Versuchskörper versagten entweder im Grundmaterial mit einem Riss, welcher nicht von der Markierung ausging, oder erzielten fünf Millionen Lastwechsel ohne sichtbaren Riss und konnten somit als Durchläufer deklariert werden.

Die Höhe des Einflusses der Markiermethoden und der damit verbundenen Verringerung der Ermüdungsfestigkeit ist im Wesentlichen abhängig von der Geometrie der durch die Kennzeichnungsmethoden eingebrachten Kerben sowie von der

Materialdicke der Prüfkörper. Die untersuchten Versuchskörper zeigen keinen mit geschweißten Kerbdetails vergleichbaren negativen Blechdickeneffekt. Mit größeren Blechdicken wurden tendenziell höhere Ermüdungsfestigkeiten erzielt, vor allem für die Versuchsserien mit gestempelten Versuchskörpern. Zusätzlich kann die Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit mit zunehmender Blechdicke auch für die gefrästen Versuchsserien der Stahlsorte S355J2 sowie die plasmamarkierten Versuchsserien beobachtet werden.

Die für die untersuchten Einzelserien erzielten Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln liegen mit mindestens $\Delta\sigma_{c,95\%} = 121 \text{ N/mm}^2$ für gestempelte Versuchskörper der Blechdicke 15 mm aus S460N auf einem hohen Niveau im Vergleich zum Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 [3]. Sogar eine gemeinsame Auswertung aller gestempelten Versuchskörper der Blechdicke $t = 15 \text{ mm}$ liefert eine, auf Grundlage der unterschiedlichen Versuchsserien, hohe Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 113 \text{ N/mm}^2$. Die Ergebnisse aller untersuchten Versuchsserien sind in in Abb. 3.26 zusammengefasst und in Tabelle 3.15 dargestellt.

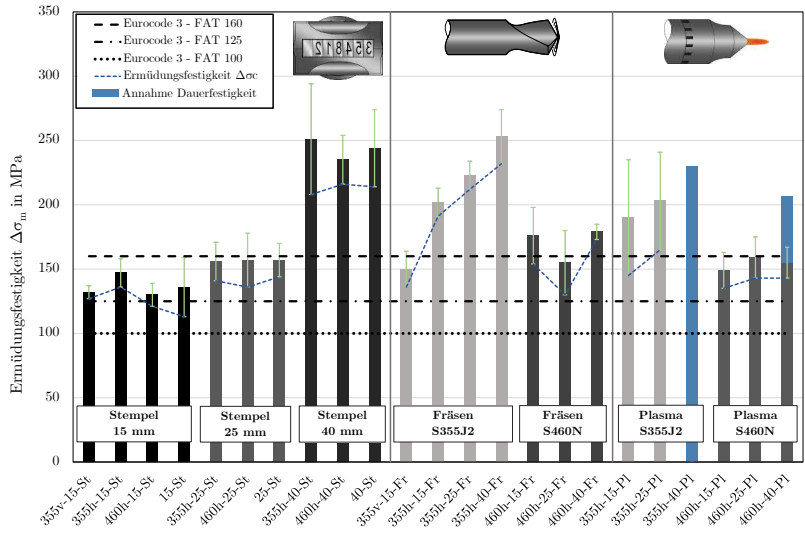


Abb. 3.26 Vergleichende Darstellung der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_m$ und den Kerbfallklassen 100, 125 und 160 entsprechend DIN EN 1993-1-9 [3] unter Angabe der Streubänder für $\Delta\sigma_{c,95\%}$ und $\Delta\sigma_{c,5\%}$

Tab. 3.15 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

	Serie	t	Anzahl	Neigung m	R_{eH}^a	$\Delta\sigma_{95\%}$	$\Delta\sigma_{50\%}$
		mm			N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Stempeln	355h-15-St	15	9	2,9	398	136	147
	355v-15-St	15	10	3,7	395	127	137
	355h-25-St	25	7	2,8	371	141	156
	355h-40-St	40	8	5,8	397	208	251
	460h-15-St	15	8	3,0	502	121	130
	460h-25-St	25	9	2,9	488	136	157
	460h-40-St	40	7	5,3	530	216	235
	15-St	15	27	3,2	-	113	136
	25-St	25	16	2,9	-	144	157
	40-St	40	15	5,7	-	214	244
Fräsen	355h-15-Fr	15	7	4,3	458	191	202
	355v-15-Fr	15	12	3,2	395	136	150
	355h-25-Fr	25	6	6,5	393	212	223
	355h-40-Fr	40	7	4,9	415	232	253
	460h-15-Fr	15	5	4,2	502	154	176
	460h-25-Fr	25	10	3,2	488	130	155
	460h-40-Fr	40	6	4,0	530	173	179
Plasma	235v-15-Pl	15	7	-	271	-	-
	355h-15-Pl	15	8	3,9	398	145	190
	355v-15-Pl	15	10	-	385	-	-
	355h-25-Pl	25	7	6,0	371	180	216
	355h-40-Pl	40	8	-	397	-	-
	460h-15-Pl	15	8	3,9	502	135	149
	460h-25-Pl	25	6	3,5	488	143	159
	460h-40-Pl	40	8	3,0 ^b	530	143	155
Nadeln	v-Na	var.	-	8	var.	-	-
	355h-15-Na	15	2	-	398	-	-
	355h-25-Na	25	2	-	371	-	-
	460h-15-Na	15	2	-	502	-	-
	460h-25-Na	25	2	-	488	-	-

^a R_{eH} nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1
^b Auswertung mit fester Wöhlerlinienneigung m = 3

4 Mikroskopische Untersuchungen zur Charakterisierung dauerhafter Kennzeichnungskerben

4.1 Allgemeines

Die Analyse und Bewertung des Ermüdungsverhaltens dauerhaft gekennzeichnete Bauteile setzt zwingend die Kenntnis über Geometrie und spezifische Merkmale der eingebrachten Kerben voraus. Wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten können Parameter wie die Tiefe der Markierung, der Öffnungswinkel der Kerbe oder die Ausprägung einer möglichen Rundung im Kerbgrund haben. Darüber hinaus ergeben sich je nach Markiermethode mehr oder weniger definierte und reproduzierbare Kerben, dessen Eigenschaften es zu bestimmen gilt. Vorarbeiten wurden hierzu bereits in [4] vorgestellt. Die durchgeführten Analysen wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch erweitert, sodass neue Erkenntnisse gewonnen werden konnten, welche hier vorgestellt werden.

Diese erweiterten Untersuchungen zur Aus- und Bewertung der Geometrie der Markierkerben liefern teilweise abweichende Ergebnisse zu den Messungen in [4], weshalb Referenzmessungen an ausgewählten Prüfkörpern durch das Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen (IFAS) mit Messgeräten erhöhter Genauigkeit durchgeführt wurden, welche im Rahmen dieser Arbeit aufbereitet und ausgewertet werden. Die Ergebnisse dieser Messungen dienen der Einordnung und Validierung bereits durchgeführter Tiefenmessungen. Bezüglich der Benennung der Versuchskörper und Versuchsserien sei an dieser Stelle auf Abschnitt 3.1, Tabelle 3.2 verwiesen.

4.2 Geometrische Parameter auf Basis fokusvariiender Mikroskopie

Um die Geometrie der Markierkerben exakt ermitteln und vergleichen zu können, wurden 3D-Modelle mittels fokusvariiender Mikroskopie [25] erstellt, im Folgenden auch als 3D-Mikroskopie bezeichnet. Mithilfe der 3D-Tiefenanalyse werden bis zu 50 Aufnahmen in verschiedenen, über die Höhe des Probekörpers

äquidistant angeordneten Schichten aufgenommen und dann zu einem Modell zusammengesetzt, siehe schematische Darstellung in Abb. 4.1. Hierbei wird die geringe Tiefenschärfe einer Mikroskopaufnahme genutzt. Für den dreidimensionalen Scan wird jedes der bis zu 50 Bilder analysiert und der Bereich des aufgenommenen Bildes detektiert, welcher die höchste Schärfe aufweist, also im Fokus liegt. Das Prinzip folgt hier der Fokuserkennung herkömmlicher Digitalkameras mittels einer Kontrastmessung. Der im Fokus liegende Bereich hebt sich besonders vom restlichen Bereich ab, siehe Abb. 4.1. Die zugehörige Tiefeninformation zu dieser Schärfeebene wird über einen Schrittmotor im Mikroskopstativ geliefert. So kann den deutlich abgegrenzten scharfen Bereichen des Bildes eine entsprechende Information über die Tiefe hinzugefügt werden. Das Zusammensetzen aller aufgenommenen Bilder in Kombination mit den Tiefeninformationen liefert ein dreidimensionales Modell, welches Messungen und Visualisierungen zerstörungsfrei erlaubt.

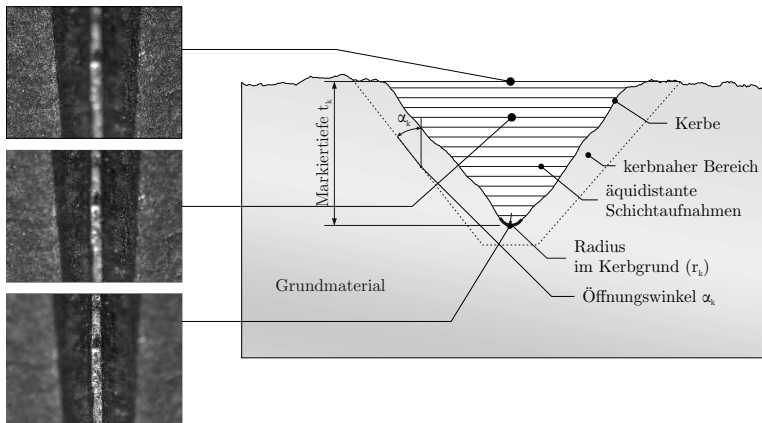


Abb. 4.1 Schematische Darstellung des Prinzips der Erstellung eines 3D-Modells aus zusammengesetzten Schichtaufnahmen mithilfe der 3D-Mikroskopie sowie maßgebende Kerbparameter

Die Vorteile dieser Methode für die vorliegenden Untersuchungen liegen in der Exaktheit der Messungen und der Visualisierung der Kerben bei gleichzeitiger zerstörungsfreier Erstellung räumlicher Modelle. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurden letztendlich die Geometrien ausgewählter Probekörper aller vier Kennzeichnungsmethoden mithilfe der 3D-Mikroskopie ausgemessen. Als wesentliche geometrische Parameter können die Markiertiefe t_k , also die Tiefe

der eingebrachten Markierung in das Grundmaterial, der Öffnungswinkel der Kerbe α_k , sowie der Ausrundungsradius im Kerbgrund r_k angeben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit sind als Grundmaterial alle Bereiche des Prüfkörpers zu verstehen, welche nicht direkt infolge der eingebrachten Kerben durch Materialabtrag oder plastische Verformungen verändert wurden. Unter dem Begriff der Kerbe ist im Allgemeinen der vollständige oder ein bestimmter Teil der Markierspur zu verstehen.

Die angestrebten Messungen im Rahmen dieser Arbeit und in [4] bieten keine statistische Absicherung, sondern sind als stichprobenartige Untersuchungen zu verstehen. Dennoch wurden für die vorliegenden Kennzeichnungen je Methode zahlreiche Messungen durchgeführt, von denen die extremalen Eigenschaften hier vorgestellt werden. Obwohl somit keine statistische Auswertung der Eigenschaften und Parameter vorliegt, kann von repräsentativen Ergebnissen ausgegangen werden.

4.3 Charakterisierung typischer Kennzeichnungskerben

4.3.1 Hartes Stempeln

Hauptuntersuchungen Für die gestempelten Versuchskörper der *Hauptuntersuchungen* wurde ein mobiles Markiergerät der Firma Hilti verwendet, siehe auch Abb. 2.5. Das mit Treibladungen angetriebene Gerät mit der Bezeichnung DX 462 wurde für die Markierungen auf die höchstmögliche Schlagleistung eingestellt und mit den stärksten Explosivkapseln geladen. Das Markierergebnis ist hier in gewissem Maß ohne große Streuungen reproduzierbar, allerdings auch abhängig vom Bediener. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, entstehen bei einer Markierung mit mehreren gleichzeitig eingesetzten Zeichen unter Umständen unregelmäßige Ergebnisse, welche auf eine nicht perfekte Ausrichtung des Markiergeräts zur Werkstoffoberfläche zurückzuführen sind, siehe Abb. 2.8. Im Rahmen der Herstellung der Markierungen wurde bewusst große Sorgfalt auf eine genaue Ausrichtung der Maschine für reproduzierbare Ergebnisse gelegt. Dennoch ließen sich ungleiche Markierungen nicht immer vermeiden, siehe Abb. 4.2. Unter Baustellen- oder Fertigungsbedingungen ist davon auszugehen, dass in der Regel ungleichmäßigere Markierungen erzeugt werden. Die Stempelmarkierung der *Voruntersuchungen* wurde mit einer stationären Markiereinheit gekennzeichnet. Nähere Details zur Maschine konnten nicht eruiert werden.

Für die gestempelten Versuchskörper der *Hauptuntersuchungen* ergeben sich für die in Abb. 4.2 angegebenen Positionen exemplarische Kerben entsprechend Abb. 4.3 und Abb. 4.4.

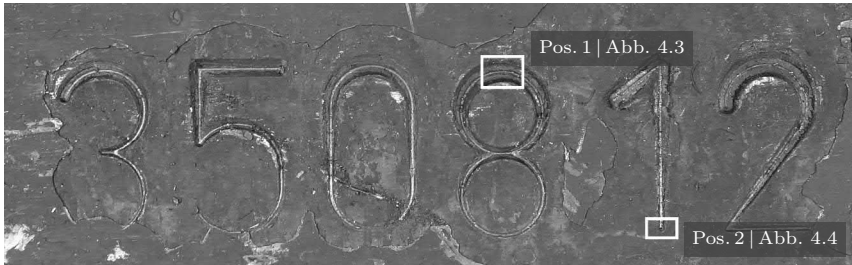


Abb. 4.2 Übersicht der dokumentierten Markierpositionen der Mikroskopbilder des Prüfkörpers S460h-15-St-7

In Abb. 4.3 ist deutlich die Form der Kerbe zu erkennen. Die Markiertiefe liegt bei ca. $800\ \mu\text{m}$ und ist damit als vergleichsweise groß einzustufen. Die installierte Kerbe ist relativ scharf, die Oberflächen der Kerben sind verhältnismäßig glatt und gleichmäßig. Im Kerbgrund ist eine minimale Abrundung vorhanden. Aufgrund des definierten Stempелеindrucks folgt die Form der Kerbe der negativen Form des Stempels und kann hierüber direkt beeinflusst werden. Aufgrund der geometrischen Ausprägung kann davon ausgegangen werden, dass sich die Spannungen im Bereich der Kerbe stärker konzentrieren als bei weiteren Kennzeichnungsmethoden. Besonders die scharfkantige Form veranlasst zu der Annahme, dass hier eine vergleichsweise hohe Beeinträchtigung der Ermüdungsfestigkeit vorliegen kann.

Die Markierung in Abb. 4.4 besitzt im Vergleich eine ähnliche Geometrie, ist jedoch deutlich weniger tief, obwohl sie aus derselben Markierspur stammt wie die in Abb. 4.3 visualisierte Kerbe. Die Markiertiefe beträgt in diesem Bereich nur ca. $260\ \mu\text{m}$ und weist somit nur ca. ein Drittel der Tiefe auf wie im Bereich von Pos. 1. Begünstigt wird die ungleichmäßige Verteilung durch eine nicht exakte Positionierung der Markierpistole. Durch die fehlerhafte Positionierung drückt sich der Stempel auf einer Seite, hier oben, tiefer in das Material als auf der anderen Seite der jeweiligen Ziffer. Die Form der Kerbe ist im Bereich von Pos. 2 ähnlich scharfkantig, weist aber einen geringfügig größeren Radius im Kerbgrund auf. Gut zu erkennen ist weiterhin der abgerundete Auslauf der Markierung.

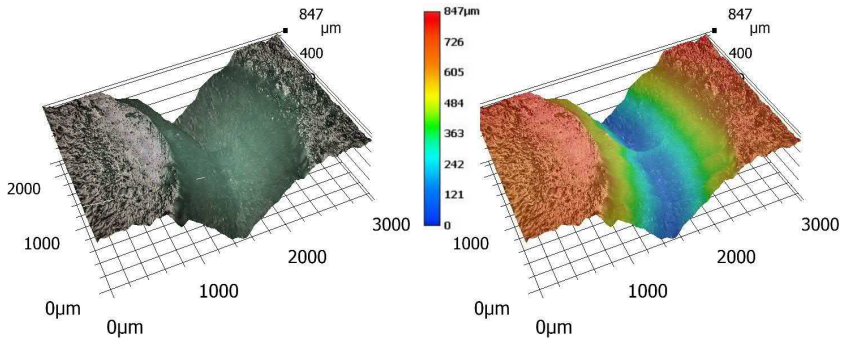


Abb. 4.3 3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-St-7 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 1 aus Abb. 4.2)

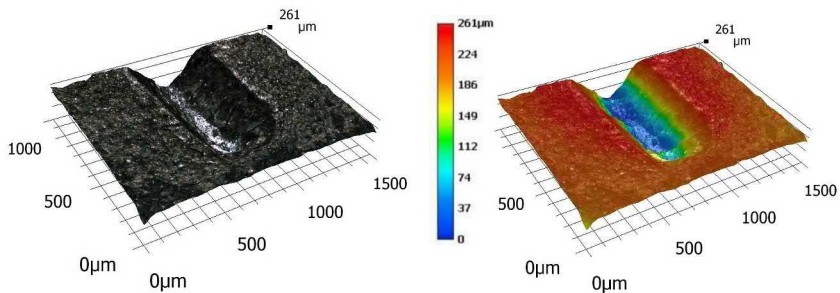


Abb. 4.4 3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-St-7 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. 2 aus Abb. 4.2)

Je zwei exemplarische Querschnitte der beiden Kerbpositionen sind zusätzlich in Abb. 4.5 gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass beide Markierungen aufgrund des identischen Markierstempels den nahezu gleichen Öffnungswinkel aufweisen. Zudem ist der etwas größere Radius der randnahen Markierung im Kerbgrund zu erkennen.

Voruntersuchungen Die Stempelmarkierung der *Voruntersuchungen* lässt sich ähnlich einordnen wie die Markierung der *Hauptuntersuchungen*. Die Markierkerben sind ähnlich steil, der Ausrundungsradius im Kerbgrund ist vergleichsweise gering, siehe Abb. 4.6 und Abb. 4.7. Besonders auffällig sind die ungleich tief markierten Zeichen des Prüfkörpers. In Abb. 4.6 (rechts) ist gut zu erkennen,

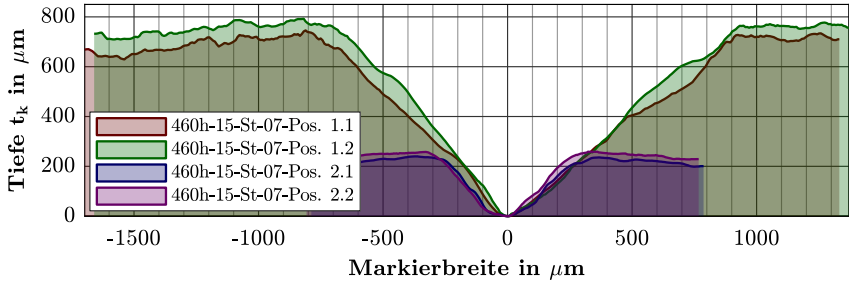


Abb. 4.5 Gegenüberstellung zweier Querschnitte durch die Stempelmarkierung des Prüfkörpers 460h-15-St-7 am Rand der Markierung (Pos. 2) und in einem tieferen Bereich (Pos. 1)

dass die beiden Buchstaben „A“ und „K“ deutlich tiefer geprägt sind als die Zeichenfolge „235“. Grund hierfür sind verschiedene Stempelgeometrien einzelner Zeichen. Die maximale Markiertiefe ist größer als bei den Prüfkörpern der *Hauptuntersuchungen*. Sie beträgt bis zu 1300 µm.

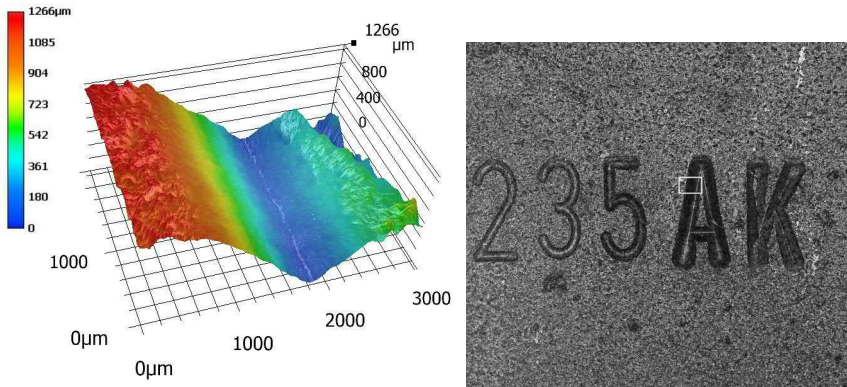


Abb. 4.6 3D-Modell eines Teils der gestempelten Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-St-04 (links) mit Messfeldposition (rechts))

4.3.2 Fräsen

Die Fräsmarkierungen wurden mit stationären, in Fertigungsstraßen integrierten Fräsmaschinen hergestellt. Hierbei stand kein automatischer Tiefenausgleich und keine direkte Tiefenkontrolle zur Verfügung, weshalb zum einen die Markiertiefe nicht direkt gesteuert werden konnte und zum anderen ein Ausgleich von Walzto-

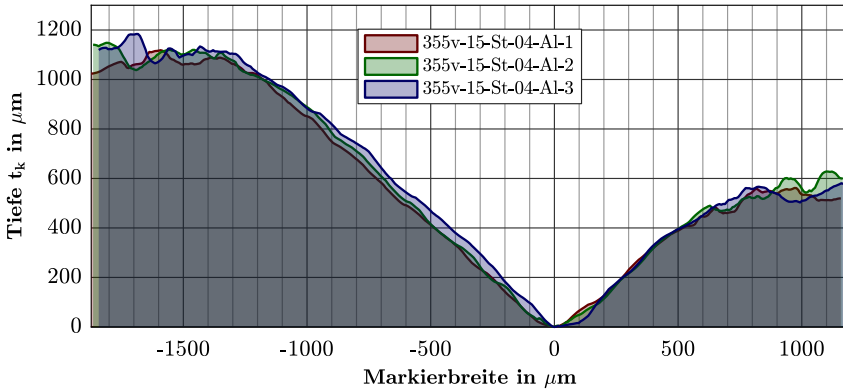


Abb. 4.7 Gegenüberstellung dreier Querschnitte durch die Stempelmarkierung des Prüfkörpers 355v-15-St-04

leranzen nicht möglich war. Da die Versuchskörper aus S355J2+N und S460N der *Hauptuntersuchungen* nicht zur gleichen Zeit markiert werden konnten, ergaben sich für die beiden Stahlsorten unterschiedliche Markiertiefen. Hierdurch sind zwar die Ergebnisse der Versuche beider Stahlsorten nicht unmittelbar vergleichbar, allerdings konnten so auch tiefere Markierungen hergestellt werden, welche für die Praxis ungünstige Bedingungen darstellen. Sowohl die Markierungen der *Haupt-* als auch der *Voruntersuchungen* wurden mit für die Praxis unüblichen Markierparametern durchgeführt. In beiden Fällen wurden Markiertiefen gewählt, welche tiefer und somit ungünstiger sind als in den jeweiligen Betrieben vorgesehen. Das für die im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen verwendete Messfeld ist in Abb. 4.8 dargestellt.



Abb. 4.8 Messfeld im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen gefräster Versuchskörper der Hauptuntersuchungen

Hauptuntersuchungen

S355J2+N Die erweiterten Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, welche über die Erkenntnisse in [4] hinausgehen, haben gezeigt, dass die Fräsmarkierungen der Versuchskörper aus S355J2+N im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* im Mittel Markiertiefen von ca. $300\text{ }\mu\text{m}$ aufweisen. In [4] wurden dagegen Markiertiefen von nur ca. $200\text{ }\mu\text{m}$ gemessen.

Die Oberfläche der Kennzeichnungen zeigt zwar einen sehr weichen Übergang zwischen dem Grundmaterial und den Kerben, siehe Abb. 4.9 und Abb. 4.10, allerdings zeigen sich im Detail innerhalb der Markierspur kleinere Mikrokerben, welche eine hohe Kerbschärfe aufweisen.

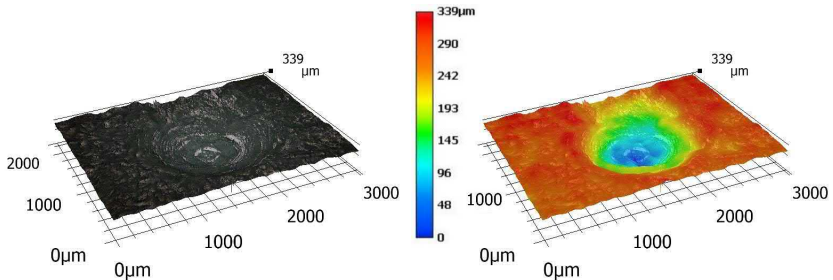


Abb. 4.9 3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)

Die kleinen, aber scharfen Kerben infolge des Fräsvorgangs zeigen sich auch bei einer Betrachtung in Richtung der Markierspur, siehe exemplarisch Abb. 4.11. Der Längsschnitt durch die Markierspur zeigt Mikrokerben, welche eine hohe Kerbschärfe aufweisen und im Bereich des jeweiligen Kerbgrundes einen sehr kleinen Rundungsradius zeigen. Hier entstehen zwar nicht sonderlich tiefe, wenngleich aber sehr scharfe Kerben, welche zu einer nicht vernachlässigbaren Spannungskonzentration führen können. Gleiches gilt für die Ansatzpunkte des Fräskopfes. Die eingebrachten Markierungen im Bereich der Ansatzpunkte sind zwar im Vergleich mit den weiteren Markiermethoden nicht sehr tief, weisen jedoch verhältnismäßig kleine Kerbradien im Kerbgrund auf. Für die *Hauptuntersuchungen* wurde ein konischer Fräskopf verwendet, welcher als ungünstig zu betrachten ist, weil dadurch die Kerbradien besonders klein werden. Wie

sehr sich dieser Effekt auf die Spannungskonzentration auswirkt kann bisher allerdings nur qualitativ abgeschätzt werden.

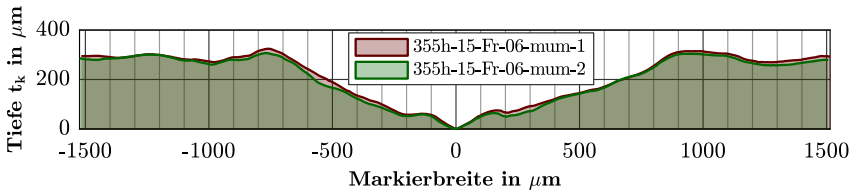


Abb. 4.10 Querschnitte durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 im Bereich des Ansatzpunktes des Fräskopfes

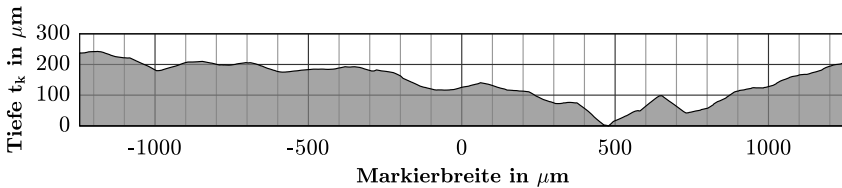


Abb. 4.11 Längsschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 im Bereich des Ansatzpunktes des Fräskopfes

S460N Die Fräsmarkierungen für die Prüfkörper der Stahlsorte S460N zeigen grundsätzlich eine ähnliche Geometrie, da sie auf derselben Maschine gekennzeichnet wurden. Allerdings dringt die Markierung tiefer in das Grundmaterial ein, weshalb sich insbesondere im Bereich der Ansatzpunkte ein anderes Bild zeigt.

Die Markiertiefen wurden zwischen 500 μm und 800 μm ermittelt. Die Messungen ergeben erneut tiefere Kerben als noch in [4], siehe exemplarisch Abb. 4.12 und Abb. 4.13. Aufgrund der fehlenden Tiefenkorrektur des Markierwerkzeugs entstehen allerdings ungleichmäßige Markierungen, bei denen die Parameter, insbesondere die Markiertiefe, innerhalb einer Markierspur deutlich variieren können. Zwei exemplarische Querschnitte durch die Kerbe sind in Abb. 4.14 dargestellt. Wie bereits bei den Markierungen der Serie 355h-Fr zeigt sich auch hier eine Rauheit innerhalb der Kerbe, welche als nicht vernachlässigbar eingestuft wird.

Der Längsschnitt durch die Markierung offenbart ebenfalls die bereits festgestellten Mikrokerben, siehe Abb. 4.15. Die zugehörige Schnittführung ist in Abb. 4.16

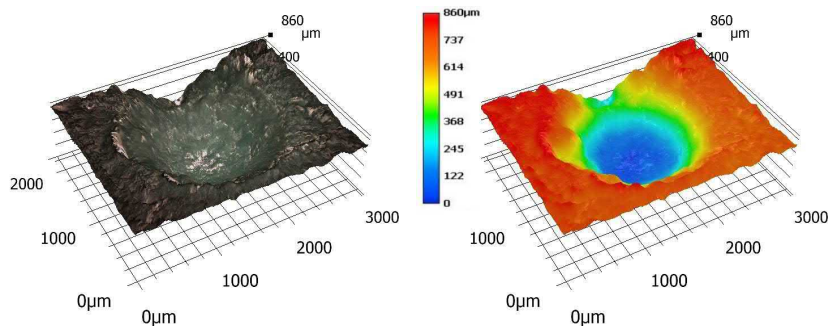


Abb. 4.12 3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Fr-04 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)

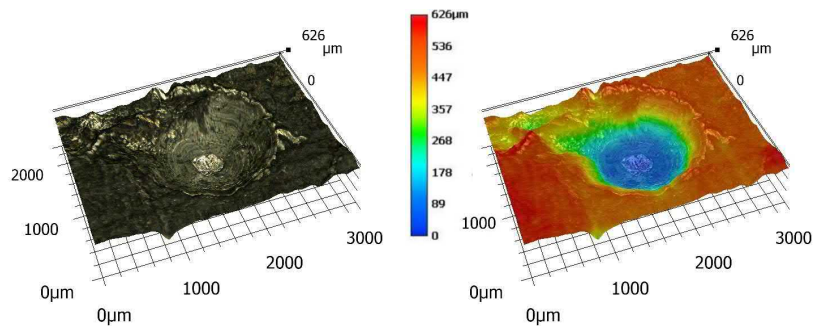


Abb. 4.13 3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Fr-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts) (Pos. „mum“ aus Abb. 4.8)

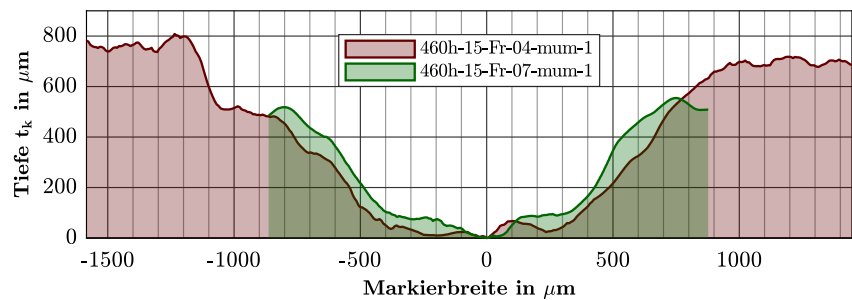


Abb. 4.14 Querschnitt durch die gefräste Markierung an Position „mum“ aus Abb. 4.8 der Prüfkörper 460h-15-Fr-04 und 460h-15-Fr-07

dargestellt. Infolge des Fräsprozesses entstehen bei derart tiefen Markierungen zwangsläufig solche Unregelmäßigkeiten, welche eine hohe Kerbschärfe zeigen. Diese können zwar je nach Schärfe und Ausprägung des Fräswerkzeugs variieren, sind aber nicht umfänglich zu vermeiden.

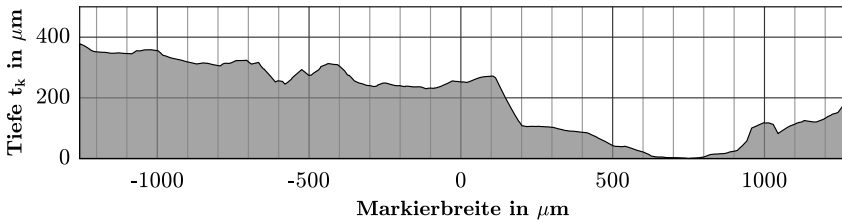


Abb. 4.15 Längsschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 460h-15-Fr-06

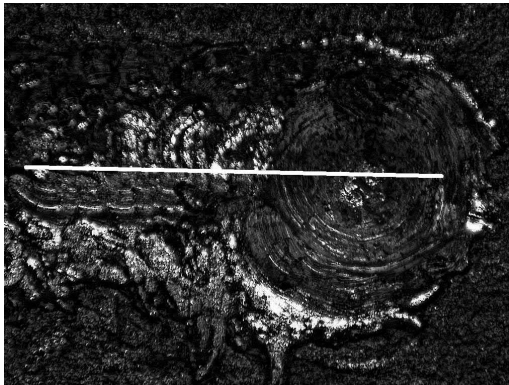


Abb. 4.16 Schnittführung des Längsschnitts in Abb. 4.15

Voruntersuchungen

Die Messungen der Fräsmarkierungen der *Voruntersuchungen* haben Markiertiefen von bis zu 450 µm ergeben, siehe Abb. 4.17 und Abb. 4.18. Die Oberflächenrauigkeiten weisen zu den Markierungen der *Hauptuntersuchungen* ähnliche Eigenschaften auf, weshalb auch von vergleichbaren Versuchsergebnissen ausgegangen werden kann. Sowohl in der Detailansicht in Abb. 4.17, als auch in der Übersicht in Abb. 4.18 sind deutlich die feinen Rillen auf der Oberfläche der Markierkerbe zu erkennen. In Abb. 4.19 und Abb. 4.20 sind zudem die ebenfalls

kleinen Kerbradien im Kerbgrund zu erkennen. Der Querschnitt in Abb. 4.20 zeigt, dass die Fräsmarkierungen teilweise abspringende Kanten mit äußerst kleinen Radien aufweisen, welche sich negativ auf die Ermüdungsfestigkeit auswirken können.

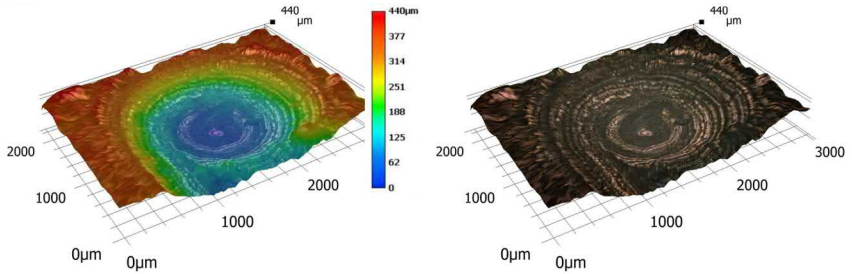


Abb. 4.17 3D-Modell eines Teils der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-Fr-04 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung

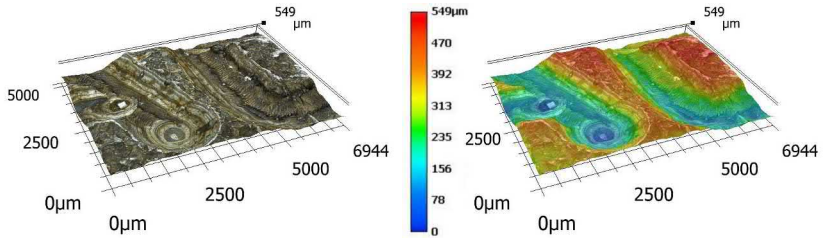


Abb. 4.18 Übersichtsmodell der gefrästen Kerbe des Prüfkörpers 355v-15-Fr-04 (links) und mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

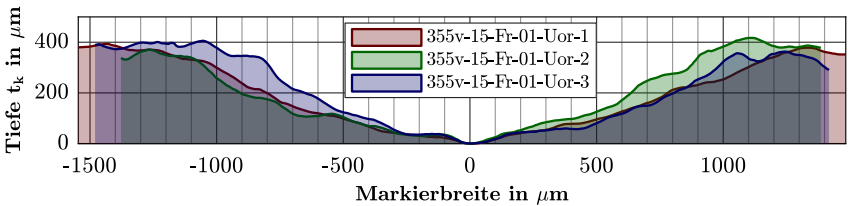


Abb. 4.19 Gegenüberstellung dreier Querschnitte durch die gefräste Markierung an Position „mum“ aus Abb. 4.8 des Prüfkörpers 355v-15-Fr-01-Uor

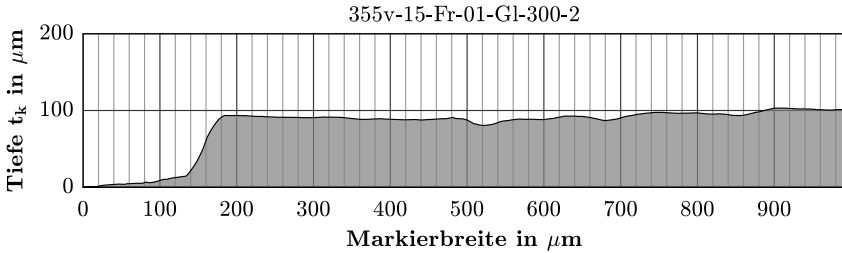


Abb. 4.20 Querschnitt durch die gefräste Markierung des Prüfkörpers 355v-15-Fr-01 unter 300-facher Vergrößerung

4.3.3 Plasamarkieren

Hauptuntersuchungen Die Plasamarkierungen im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* sowie auch der Serie 235v-15-P1 der *Voruntersuchungen* wurden mit einem Plasamarkierer „PeddiWriter“ der Firma Peddinghaus Anlagen & Maschinen GmbH hergestellt.

Im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* wurden zunächst Probekörper mit einer Markierstromstärke von 6 Ampere und einer Markiergeschwindigkeit von 6,1 m/min gekennzeichnet, siehe Abb. 4.21 (rechts). Dies entsprach der Konfiguration im Einsatz der ausführenden Firma. Erste Ermüdungsversuche an je einem Prüfkörper der Blechdicken 15 mm, 25 mm, und 40 mm aus S355J2+N zeigten allerdings quasi keinen Einfluss der Markierung auf die Ermüdungsfestigkeit: Die Prüfkörper versagten jeweils im Grundmaterial oder konnten als Durchläufer gewertet werden, obwohl sie relativ hohen Ermüdungsbeanspruchungen mit Oberspannungen von 85 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 unterlagen, siehe Abschnitt 3.4.4. Daraufhin wurden die Markierparameter angepasst und für die weiteren Probekörper eine Stromstärke von 10 Ampere bei gleichbleibender Markiergeschwindigkeit gewählt. Der visuelle Unterschied der beiden Markierstromstärken ist in Abb. 4.21 dargestellt.

Markierkerben infolge von Plasamarkierungen können grundsätzlich in zwei Bereiche eingeteilt werden:

- (a) Ansatz, End- und Umkehrpunkte sowie
- (b) übrige Bereiche.



Abb. 4.21 Vergleich unterschiedlicher Plasmamarkierstromstärken von (links) 10 A und (rechts) 6 A

In Bereichen, in denen der Plasmabrenner angesetzt wird, ist die Markierung maschinenbedingt deutlich tiefer als in den anderen Bereichen. Die Maschinensteuerung benötigt nach dem Starten des Plasmastrahls einen kurzen Moment um den Vorschub der Plasmadüse zu starten. In dieser Zeit brennt sich der Plasmastrahl bereits in das Material. Die Zeit reicht aus, um an den Ansatzpunkten deutlich tiefere Markierungen zu erzeugen. Das gleiche Prinzip gilt für Umkehrpunkte und Wendungen in Markierspuren sowie am Ende eines Markierzeichens, wenn der Plasmastrahl beendet wird. Zwar gehören der sogenannte „fliegende Anstich“, bei dem der Plasmastrahl erst in der Bewegung gezündet wird sowie die synchron zur Markiergeschwindigkeit angepasste Markierstromstärke zum Stand der Technik, siehe auch [16], allerdings finden sich diese Optimierungen zur Vermeidung von tiefen Einbränden in Ansatz- oder Umkehrpunkten in der Praxis nur selten wieder. Diese Optimierungen werden daher nicht gesondert betrachtet.

Die variierenden Markiertiefen spiegeln sich auch in den Messungen der Markiergeometrien wider. Während der Einbrand im Bereich der Ansatzpunkte maximale Markiertiefen von ca. $700\ \mu\text{m}$ aufweist, siehe Abb. 4.22 und Abb. 4.23, ist die Markiertiefe bei den gegebenen Markierparametern in der restlichen Markierspur mit $300\ \mu\text{m}$ deutlich kleiner, siehe exemplarisch Abb. 4.24 und Abb. 4.25.

Dieses Verhalten zeigt sich ebenfalls sehr deutlich in der Übersichtsdarstellung des Prüfkörpers 460h-15-PI-7 in Abb. 4.26. Gut zu erkennen sind die blauen tieferen Einbrände im Bereich der beiden Ansatz- bzw. Endpunkte mit einer Markiertiefe von ca. $600\ \mu\text{m}$ sowie die grünliche Markierspur, welche nur ca. $250\text{--}300\ \mu\text{m}$ tief ist. Außerdem lässt sich in der Übersicht ebenfalls sehr gut das

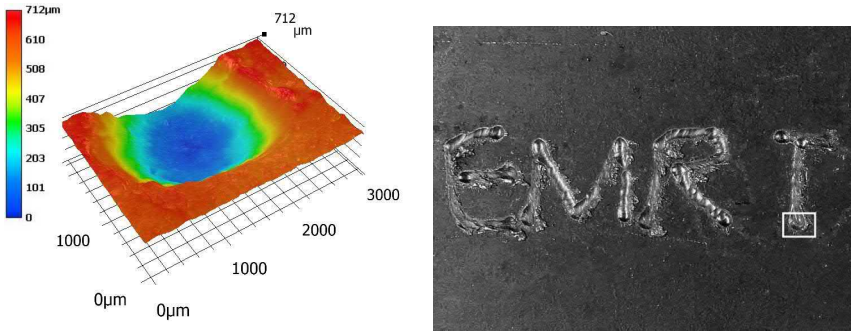


Abb. 4.22 3D-Modell eines Teils der plasmamarkierten Kerbe des Prüfkörpers 355h-15-Pl-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung

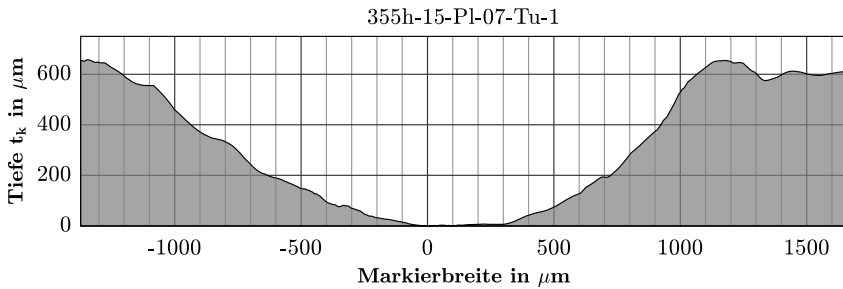


Abb. 4.23 Querschnitt durch einen Teil der plasmamarkierten Markierung des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07

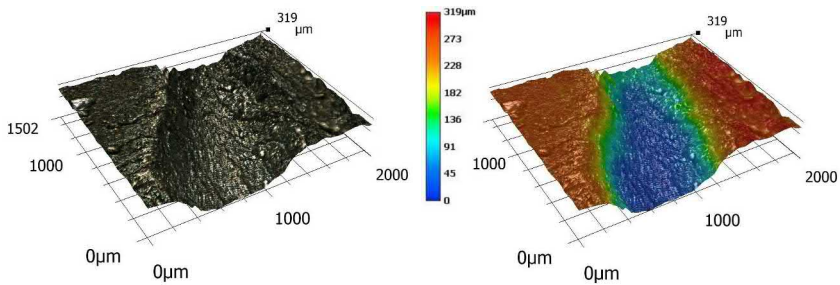


Abb. 4.24 3D-Modell eines Teils der plasmamarkierten Kerbe des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

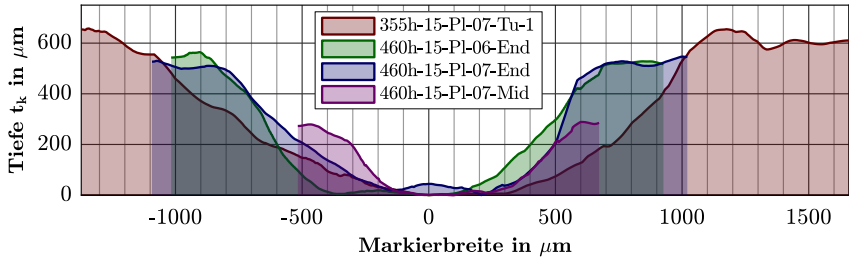


Abb. 4.25 Vergleich verschiedener Querschnitte durch die Markierspur plasmamarkierter Prüfkörper

aufgeschmolzene Material in rötlicher Farbe erkennen, welches sich während des Markiervorgangs teilweise am Rand der Markierung ablagert.

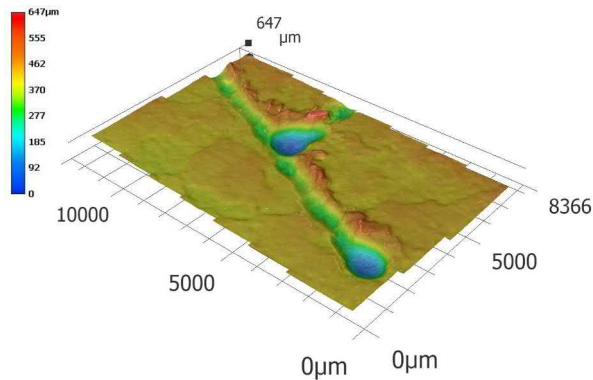


Abb. 4.26 Übersicht eines Teils der Plasmamarkierung des Prüfkörpers 460h-15-Pl-07

Generell liefern Plasmamarkierungen ausgerundete Markiergeometrien mit weichen Übergängen zwischen dem Grundmaterial und der Markierung. Bei tieferen Markierungen infolge größerer Stromstärken oder in Bereichen von Ansatzpunkten wird der Öffnungswinkel der Kennzeichnungen steiler, was einen negativen Effekt auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Der relativ große Ausrundungsradius im Kerbgrund lässt sich allerdings sowohl im Bereich der Ansatzpunkte als auch im restlichen Bereich der Markierungen erkennen. Eine hohe Oberflächenrauigkeit wie bei den gefrästen Markierungen lässt sich nicht nachweisen.

Voruntersuchungen Im Rahmen der *Voruntersuchungen* wurden zwei plasma-markierte Serien untersucht. Serie 235v-15-Pl wurde mit dem gleichen Plasma-markiergerät hergestellt wie die Markierungen der *Hauptuntersuchungen*, Serie 355v-15-Pl wurde mit einem nicht näher spezifizierten Plasmamarker gekennzeichnet. Grundlegender Unterschied beider Serien war die Größe der zu markierenden Schriftzeichen. Serie 235v-15-Pl wurde mit vergleichsweise filigranen Zeichen gekennzeichnet, Serie 355v-15-Pl mit deutlich größeren Buchstaben. Daraus resultieren auch unterschiedlich große versagensrelevante Markiertiefen beider Serien, siehe exemplarisch Abb. 4.27 bis Abb. 4.29.

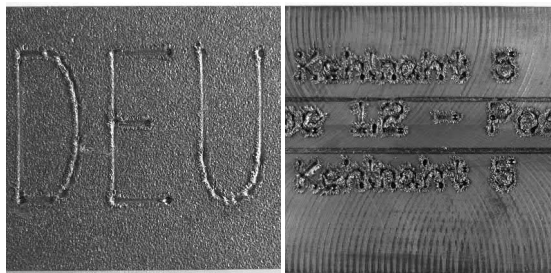


Abb. 4.27 Vergleichende Darstellung der Markierlayouts der Versuchsserien 355v-15-Pl (links) sowie 235v-15-Pl (rechts)

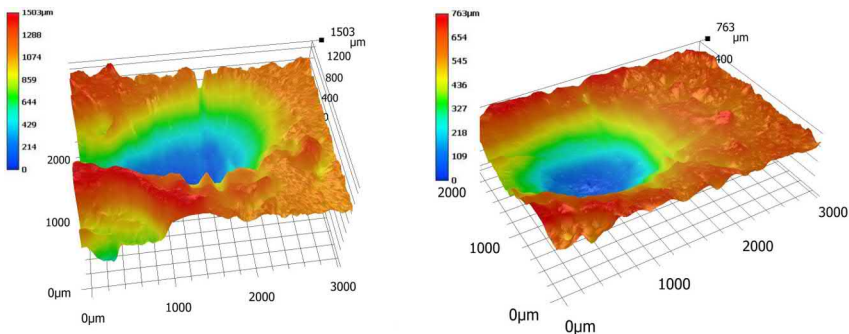


Abb. 4.28 Vergleich versagensrelevanter Markiertiefen zweier Prüfkörper 235v-15-Pl-01 (links) und 355v-15-Pl-06 (rechts) anhand von 3D-Modellen

Die Trägheit des Plasmamarkiergeräts während der Markierung lässt sich zudem gut in einem Höhenplot des Prüfkörpers 235v-15-Pl-07 darstellen, siehe Abb. 4.30.

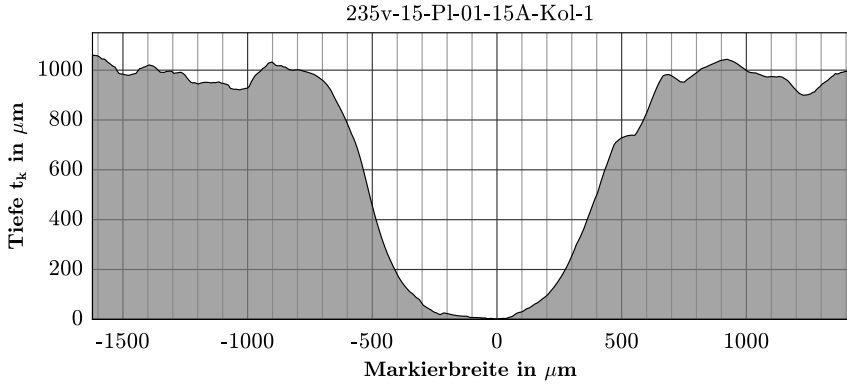


Abb. 4.29 Querschnitt durch die Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers S235v-15-Pl-01, welcher mit einer Markierstromstärke von 15 A und einer Markiergeschwindigkeit von 6,1 m/min gekennzeichnet wurde

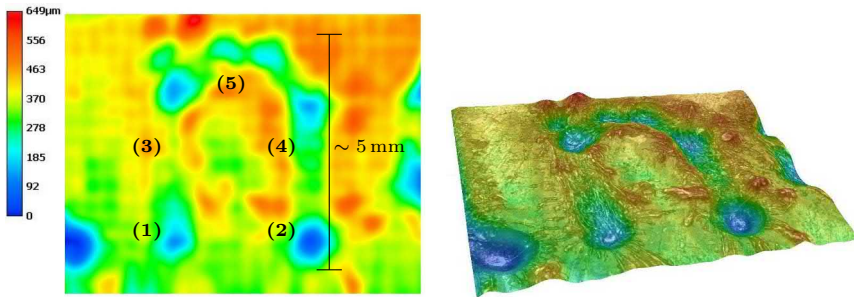


Abb. 4.30 Höhenplot eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 235v-15-Pl-07

Dargestellt sind das dreidimensionale Modell als Übersicht (rechts) sowie der zugehörige Tiefenplot (links) des Prüfkörpers 235v-15-Pl-07. Die Bilder zeigen die Markierung des Buchstaben „n“. In Bereich (1) und (2) des Höhenplots lassen sich der Beginn sowie das Ende der Markierung des Buchstabens erkennen. Die Markierung ist hier aufgrund der bereits genannten Gegebenheiten tiefer. In Bereich (3) und (4) des Plots wird die Markierung deutlich flacher, da nun die eingestellte Markiergeschwindigkeit erreicht wird. In Bereich (5) beschreibt der Verlauf der Markierung eine Kurve. Aufgrund der Maschinensteuerung verlangsamt sich die effektive Markiergeschwindigkeit. Infolgedessen wird die Kennzeichnung sowohl unregelmäßiger als auch tiefer.

Hierbei ist zu beachten, dass die Schriftzeichen der betrachteten Markierung lediglich eine Schrifthöhe von ca. 5 mm aufweisen. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erläutert, stellen derart filigrane Strukturen in der Regel Probleme für gleichmäßige Plasmamarkierungen dar. Das Problem beim Markieren derart kleiner Zeichen mittels der Plasmamarkierung ist, dass die Markiergeschwindigkeit nicht ohne Weiteres reduziert werden kann, um die Genauigkeit der Steuerung zu erhöhen, da sich im Gegenzug auch die Tiefe der Markierung erhöht. Zwar lässt sich wiederum die Markierstromstärke reduzieren, allerdings kann dieser Vorgang innerhalb einer Markierung nicht immer reibungslos gesteuert werden.

4.3.4 Nadeln

Die im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* untersuchten Nadelmarkierungen wurden mit einem mobilen Markiergerät der Firma MARKATOR® Manfred Borries GmbH hergestellt. Die Nadel des Markiertools FlyMarker Pro wurde dabei mit einem extra starken Magnet angetrieben, um tiefe Markierungen zu erzeugen. In einem ersten Ermüdungsversuch an einem Prüfkörper aus S355J2+N mit einer Blechdicke von 25 mm zeigten sich jedoch selbst bei einer Ermüdungsbeanspruchung mit einer Oberspannung von 85 % der Streckgrenze nach Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach fünf Millionen Lastwechseln keine sichtbaren Schädigungen am Probekörper, so dass dieser Versuch als Durchläufer zu werten war. Daraufhin wurden für die weiteren Nadelmarkierungen die Markierparameter insofern angepasst, als dass jeder Nadelschlag zweifach ausgeführt wurde, um eine künstlich erhöhte Markiertiefe zu erzielen.

Die so erhaltenen Markierungen wiesen letztendlich eine Tiefe von ca. 400 μm auf, siehe Abb. 4.31 und Abb. 4.32. Charakteristisch für die hier untersuchten Nadelmarkierungen sind die besonders runden Formen der installierten Kerben. Der Übergang zwischen dem Grundmaterial und der Kerbe ist fließend und der Ausrundungsradius im Kerbgrund ist relativ groß. Neben dem großen Öffnungswinkel und der geringeren Tiefe der Kerbe können diese Faktoren verantwortlich für ein optimiertes Ermüdungsverhalten sein. Die im Rahmen der *Haupt- und Voruntersuchungen* vermessenen Kerben zeigten sich in ihrer Geometrie durchaus vergleichbar, wenngleich sich die Markiertiefe im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* als geringfügig größer herausgestellt hat.

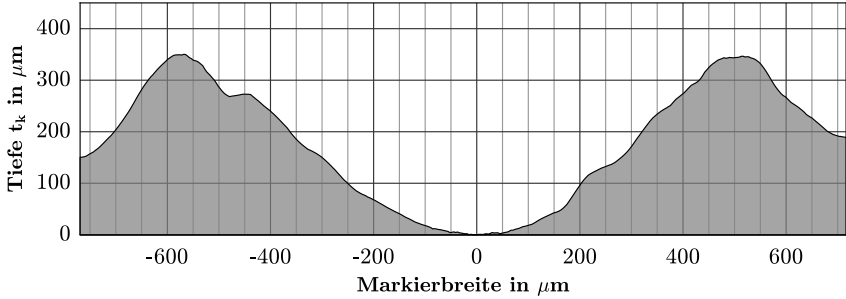


Abb. 4.31 Querschnitt durch die Markierung des nadelmarkierten Prüfkörpers 355h-15-Na-02

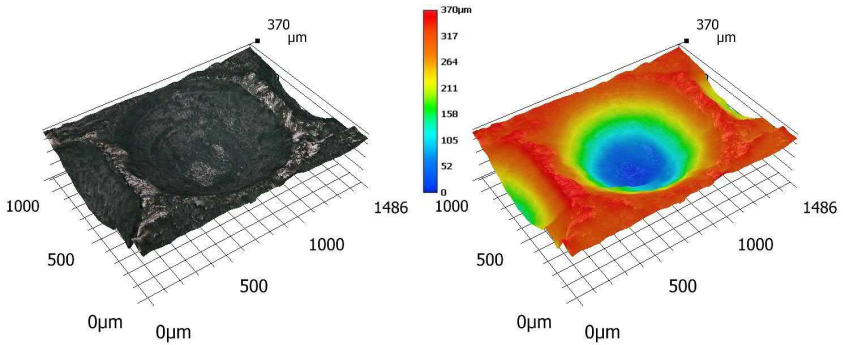


Abb. 4.32 3D-Modell eines Teils der Nadelmarkierung des Prüfkörpers 355h-15-Na-02 als fotografische Darstellung (links) sowie mit Markiertiefenkennzeichnung (rechts)

4.4 Validierung der Messwerte anhand von Referenzmessungen

Die Methode der fokusvariierenden Mikroskopie liefert detailgetreue und hochauflösende dreidimensionale Abbildungen der Markierkerben. Die Ergebnisse der Messungen geben Aufschluss über Unterschiede und Gemeinsamkeiten verschiedener Kennzeichnungsmethoden und den damit eingebrachten Markierungen. Dennoch haben sich in [4] teilweise zu dieser Arbeit abweichende Markiertiefen ergeben, weshalb die Messkette mit Referenzmessungen abgesichert wurde.

Messprobleme können bei der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten „einfachen“ fokusvariierenden Mikroskopie insbesondere dann auftreten, wenn den aufgenommenen Einzelbildern, oder Teilen dieser, falsche Höheninformationen zugeordnet werden. Dies kann vorkommen, wenn die Schärfebene des Bildes

nicht eindeutig ermittelt werden kann, weil beispielsweise das aufgenommene Bild stark über- oder unterbelichtet ist. Stark reflektierende Oberflächen führen ebenso zu Messfehlern, weil auch hier die Bildverarbeitung die Schärfe bzw. den Fokus nicht eindeutig ermitteln und zuordnen kann. Daher ist für die Validierung der Messungen insbesondere von Interesse, ob die Tiefeninformationen korrekt übergeben und zugeordnet wurden. Sollten also die ermittelten Markiertiefen der verschiedenen Messreihen übereinstimmen, kann davon ausgegangen werden, dass auch weitere aus den Modellen bestimmte Parameter und Eigenschaften als verifiziert angenommen werden können.

Bei der multidirektionalen fokusvariierenden Mikroskopie werden nicht nur äquidistante Aufnahmen über die Tiefe der Probe durchgeführt, sondern darüber hinaus äquidistante Aufnahmen aus unterschiedlichen Perspektiven zu einem Modell zusammengefügt. Neben der Perspektive der Optik wird hierbei ebenfalls die Lichtperspektive variiert. Dies hat den Vorteil, dass zum einen die Messung aus verschiedenen Perspektiven aufgrund redundanter Messpunkte Messfehler reduziert und zum anderen besonders bei metallischen Werkstoffen durch die Variation des Lichtwinkels Reflektionen die Messgenauigkeit weniger stark beeinträchtigen.

Die multidirektionale fokusvariierende Mikroskopie liefert so eine Auflösung von bis zu $0,015\ \mu\text{m}$ bei 100-facher Vergrößerung. In der im Rahmen der Referenzmessungen eingestellten fünffachen Vergrößerung liegt eine Auflösung von $0,6\ \mu\text{m}$ vor. Die Messgenauigkeit für eine Schichthöhe von 1 mm liegt bei $0,5\ \mu\text{m}$. Damit liegt eine im Vergleich zur „einfachen“ fokusvariierenden Mikroskopie noch einmal deutlich erhöhte Genauigkeit mit größerer Fehlertoleranz vor, weshalb die Messungen als Referenzmessungen eingestuft werden können.

Hartes Stempeln

Die Ergebnisse der Referenzmessungen an gestempelten Prüfkörpern der *Hauptuntersuchungen* sind in Abb. 4.33 und Abb. 4.34 dargestellt. Die Übersicht in Abb. 4.33 zeigt deutlich, dass im oberen Bereich des dargestellten Messfeldes der Ziffer „8“ die Markierung am tiefsten ist. Die Markiertiefe beträgt hier ca. $750\ \mu\text{m}$ bis $800\ \mu\text{m}$. Die gemessene Markiertiefe stimmt mit den Messungen in Abschnitt 4.3.1 überein, wo Markiertiefen von ca. $800\ \mu\text{m}$ gemessen wurden. Die vergrößerte Darstellung in Abb. 4.34 zeigt außerdem gute Übereinstimmung für den Verlauf und die Struktur der Kerbe. Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 lassen

sich der kleine Radius im Kerbgrund sowie die glatten Wangenflächen erkennen. Die Referenzmessungen zeigen hier ein deutlich vergleichbares Ergebnis.

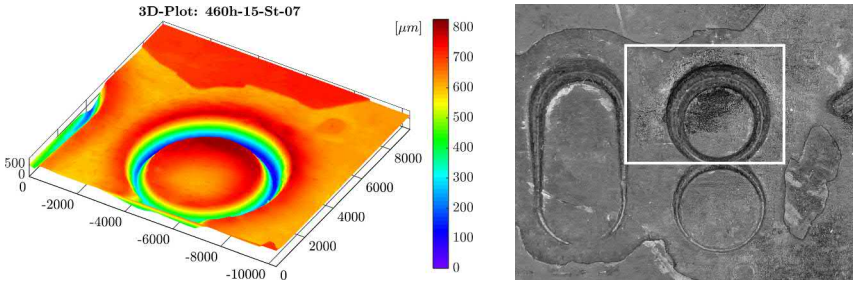


Abb. 4.33 3D-Modell der Referenzmessung eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 460-15-St-07 in fünffacher Vergrößerung (links) sowie Darstellung des Messbereichs (rechts)

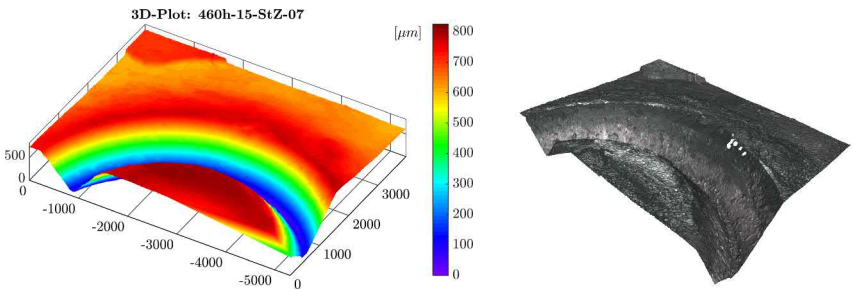


Abb. 4.34 Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 460-15-St-07 aus Abb. 4.33 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

Die untersuchte Markierkerbe des Prüfkörpers 355v-15-St-04 aus den *Voruntersuchungen* ist in Abb. 4.35 dargestellt. Aufgrund der lediglich fünffachen Vergrößerung lässt sich mithilfe der Referenzmessungen ein deutlich größerer Messbereich abbilden. Dennoch liefern sowohl die Messungen in Abschnitt 4.3.1 als auch die Referenzmessungen identische Ergebnisse. Die gemessene Markiertiefe der Referenzmessung beträgt ca. $1250\ \mu\text{m}$ bis $1300\ \mu\text{m}$. In Abschnitt 4.3.1 wurden ebenfalls Markiertiefen von bis zu $1300\ \mu\text{m}$ gemessen. Zudem ist auch die Qualität der Messungen, abgesehen von der Größe des Messfeldes, vergleichbar. Aus beiden Messmethoden gehen die gleichen Markiercharakteristika hervor.

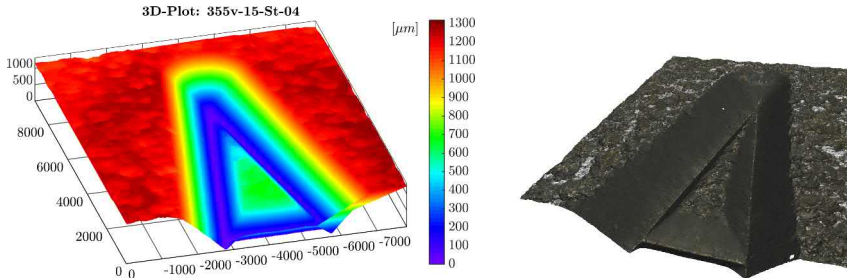


Abb. 4.35 Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gestempelten Prüfkörpers 355v-15-St-04 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

Fräsen

S355J2+N Die Bestimmung der Markiertiefe stellt sich bei den gefrästen Versuchskörpern der Stahlorte S355J2 als etwas komplexer dar. Aufgrund der rauen Oberfläche des Grundmaterials ist die Bestimmung des Bezugspunktes zur tiefsten Stelle der Markierung nicht zwingend eindeutig, siehe Abb. 4.36. In Abschnitt 4.3.2 konnten dennoch Markiertiefen von bis zu $400\ \mu\text{m}$ ermittelt werden. Diese bestätigen sich auch in den Referenzmessungen in Abb. 4.36. Je nach Wahl des Bezugspunktes der Bauteiloberfläche ergeben sich Markiertiefen um $350\ \mu\text{m}$ bis $400\ \mu\text{m}$. Diese lassen sich mit den Messungen in Abschnitt 4.3.2 vereinbaren. In der Referenzmessung ist besonders gut der Ansatzpunkt des Fräskopfes sichtbar. Aus den Aufnahmen mit vergleichsweise hoher Auflösung geht deutlich hervor, dass die Oberfläche der Kerbe einen deutlich ungleichmäßigeren Verlauf zeigt.

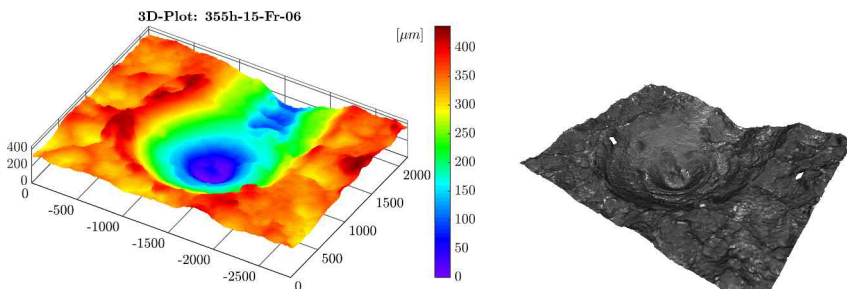


Abb. 4.36 Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gefrästen Prüfkörpers 355h-15-Fr-06 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

S460N Die Referenzmessung des Prüfkörpers 460h-25-Fr-04 in Abb. 4.37 liefert eine Markiertiefe von ca. $800\text{ }\mu\text{m}$ im Bereich des Ansatzpunktes der Fräsmarkierung. Im Vergleich dazu ergibt sich in Abschnitt 4.3.2 für die gleiche Position ebenfalls eine Markiertiefe von ca. $800\text{ }\mu\text{m}$, siehe auch Abb. 4.12 und Abb. 4.14. Die Messungen in Abschnitt 4.3.2 können somit ebenfalls bestätigt werden. In den Referenzmessungen wird aufgrund des großen Messfeldes deutlich, dass die Rauheit der Oberfläche der Fräsmarkierungen nicht nur im Kerbgrund aufzufinden ist, sondern ebenfalls im Bereich der Wangen der Kerben. Die Darstellung in Abb. 4.37 zeigt deutlich, dass infolge des Fräsvorgangs Material offensichtlich nicht nur abgetragen, sondern auch verformt und verteilt wird. Infolgedessen entstehen scharfe Grate am Rand der Markierung, welche grundsätzlich nicht nur eine Spannungskonzentration verursachen, sondern auch Ausgang für Ermüdungsrisse sein können. Weiterhin ist denkbar, dass bereits durch den Prozess des Fräsens Risse in die Oberfläche des Materials eingebracht werden, welche sich dann bei Ermüdungsbeanspruchung aufweiten.

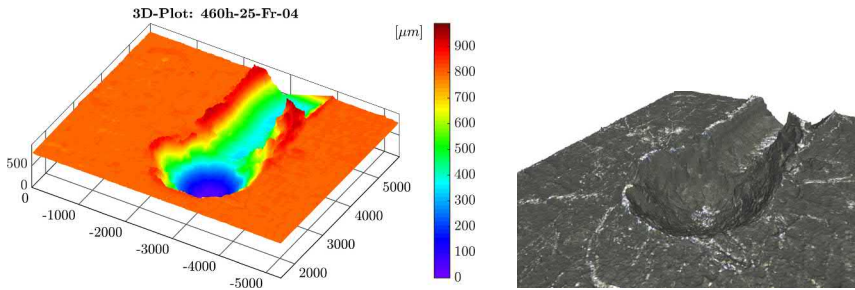


Abb. 4.37 Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des gefrästen Prüfkörpers 460h-25-Fr-04 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

Plasmamarkierung

Die Referenzmessung des plasmamarkierten Prüfkörpers 355h-25-Pl-07 in Form eines 3D-Koordinatennetzes ist in Abb. 4.38 dargestellt. Die Referenzmessung liefert für diesen Prüfkörper und für die entsprechende Prüfposition eine Markiertiefe von ca. $650\text{ }\mu\text{m}$. Dieses Resultat stimmt sehr gut mit den Messungen der fokusvariierenden Mikroskopie überein. Ebenfalls gut zu erkennen ist der für eine Plasmamarkierung charakteristische weiche Verlauf der Markierspur sowie der Markierkerbe selbst, siehe auch Abb. 4.39. Abgesehen von der gewählten

Vergrößerung liefern beide Messverfahren präzise und vergleichbare Oberflächen für den plasmamarkierten Prüfkörper.

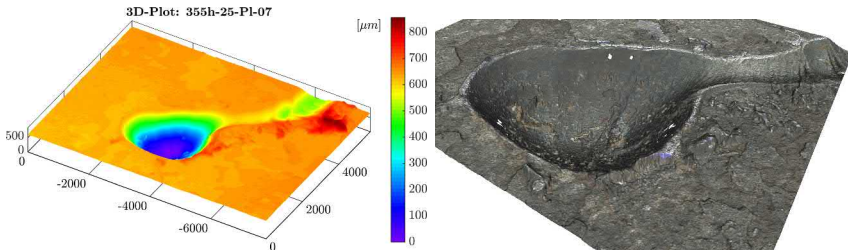


Abb. 4.38 Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 355h-25-Pl-07 als 3D-Modell mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

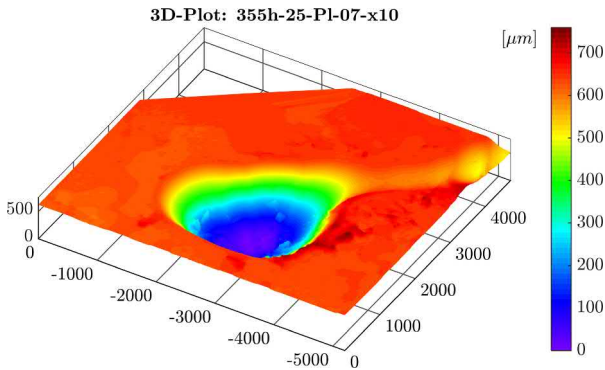


Abb. 4.39 Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des plasmamarkierten Prüfkörpers 355h-25-Pl-07 aus Abb. 4.38 als 3D-Modell

Nadeln

Die Ermittlung der Markierparameter genadelter Prüfkörper ergab in Abschnitt 4.3.4 Markiertiefen von ca. $400\ \mu\text{m}$. Diese Markiertiefen können anhand der durchgeführten Referenzmessungen bestätigt werden. Die in Abb. 4.40 und Abb. 4.41 dargestellten Nadelmarkierungen weisen Markiertiefen von ca. $350\ \mu\text{m}$ auf. Insbesondere der fotografischen Darstellung in Abb. 4.40 (rechts) lässt sich darüber hinaus gut die fast perfekt halbrunde Form der Kerben entnehmen.

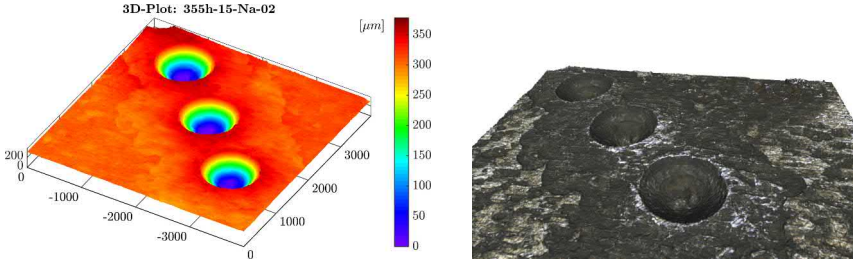


Abb. 4.40 Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des genadelten Prüfkörpers 355h-15-Na-02 mit Tiefenangabe (links) und ohne Tiefenangabe (rechts)

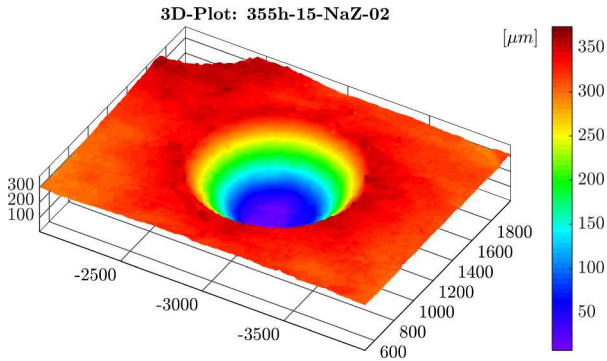


Abb. 4.41 Vergrößerte Darstellung des 3D-Modells eines Teils der Markierung des genadelten Prüfkörpers 355h-15-Na-02 aus Abb. 4.40 als 3D-Modell

4.5 Zusammenfassende Erläuterungen

Für eine Charakterisierung der geometrischen Ausprägungen der durch die vier dauerhaften Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasma-markieren und Nadeln eingebrachten Kerben wurden mittels fokusvariiender Mikroskopie 3D-Modelle erstellt, anhand derer sich die unterschiedlichen Eigenschaften der eingebrachten Kerben bestimmen lassen. Diese Messungen beruhen zwar auf den Arbeiten in [4], wurden aber deutlich erweitert. Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Kennwerte, insbesondere die gemessenen Markiertiefen, weichen trotz gleicher Messeinrichtung teilweise erheblich von den Ergebnissen in [4] ab. Dies liegt vor allem daran, dass sich aufgrund neuer Erkenntnisse die Messgenauigkeit erhöhen ließ. Nichtsdestotrotz galt es aufgrund abweichender Ergebnisse die Messkette zu verifizieren und abzusichern, weshalb unabhängige

Messungen an ausgewählten Markierungen durch das Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen der RWTH Aachen (IFAS) durchgeführt wurden. Die Messungen erfolgten an einem Mikroskop mittels multidirektionaler fokusvariierender Aufnahmen und wurden im Rahmen dieser Arbeit aufbereitet und ausgewertet. Diese Referenzmessungen bestätigen zum einen die Ergebnisse der erweiterten Messungen im Rahmen dieser Arbeit, liefern darüber hinaus aber noch weitere Erkenntnisgewinne.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jede Markiermethode eine spezifische Kerbgeometrie hervorruft. Die Geometrie der Kerben ist neben den hier vorgestellten grundlegenden Eigenschaften im Wesentlichen abhängig von den gewählten Markierwerkzeugen und Markierparametern. Dennoch lassen sich durch die angestrebten Untersuchungen wesentliche Eigenschaften der Markiermethoden erkennen, welche Rückschlüsse auf das Ermüdungsverhalten liefern können.

Die geringste Kerbschärfe weisen im Rahmen dieser repräsentativen Untersuchungen die **Nadelmarkierungen** auf. Obwohl die Markierungen im Rahmen der *Voruntersuchungen* und *Hauptuntersuchungen* von unterschiedlichen Firmen und Projektpartnern erstellt wurden, weisen alle vergleichbare Eigenschaften auf. Wenngleich im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* keine speziell abgerundeten Nadelköpfe verwendet wurden, ergaben sich Markiergeometrien, welche eine fast perfekt halbrunde konkave Form aufweisen. Dabei ist zusätzlich zu bemerken, dass für die hergestellten Kerben bewusst Parameter eingestellt wurden, welche für Nadelmarkierungen besonders tiefe Kerben produzieren. In der Praxis kann davon ausgegangen werden, dass die Kerben keine bedeutend größeren Markiertiefen aufweisen. Im Mittel wurden Kennzeichnungstiefen von ca. $400\text{ }\mu\text{m}$ gemessen.

Im Allgemeinen weisen **Plasmamarkierungen** eine ähnlich geringe Kerbschärfe auf. Die durch den Plasmastrahl erzeugte Markierspur folgt im Querschnitt ebenfalls einer vergleichsweise runden, halbelliptischen Form, so dass hier zunächst weniger starke Spannungskonzentrationen vermutet werden. Allerdings reagieren Plasmamarkierungen deutlich empfindlicher auf Änderungen der Markierparameter. Bereits eine kurze Verweildauer des Plasmabrenners verursacht deutlich tiefere Kerben. Ebenso führen langsamere Markiergeschwindigkeiten, höhere Stromstärken und ungünstige Kennzeichnungslayouts zu tieferen und somit auch schärferen Kerben. Im Rahmen der *Voruntersuchungen* wurden derart tiefe Kerben bewusst erzeugt. Während die Plasmamarkierungen mit praxisüblichen

Parametern Markiertiefen von bis zu $700\text{ }\mu\text{m}$ erzeugen, liefern diese mit ungünstigen Parametern hergestellten Kennzeichnungen Kerben mit Tiefen von teilweise deutlich über $1000\text{ }\mu\text{m}$. Diese tiefen Kennzeichnungen haben zwar immer noch einen vergleichsweise großen Ausrundungsradius im Kerbgrund, allerdings sind die Wangenflächen der eingebrachten Kerben dann deutlich steiler. Es kann vermutet werden, dass dies einen negativen Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit hat. Wie groß dieser Effekt ausfällt, kann an dieser Stelle noch nicht belegt werden. Nichtsdestotrotz zeigen die Plasmamarkierungen, dass hinsichtlich ihrer Geometrie viel Potenzial für ermüdungsgerechte Kennzeichnungen besteht, wenngleich die Prozesssicherheit nicht zwingend in gleicher Genauigkeit wie beispielsweise bei Nadelmarkierungen gewährleistet werden kann. Mögliche Optimierungen, wie der sogenannte „fliegende Anstich“ oder die synchron zur Markiergeschwindigkeit veränderte Stromstärke, werden in der Praxis häufig nicht verwendet und werden daher nicht berücksichtigt.

Die Markiertiefe von **Fräsmarkierungen** kann im Gegensatz zu Plasmamarkierungen deutlich robuster gesteuert werden und reagiert weniger empfindlich auf maschinenbedingte Trägheiten oder filigrane Kennzeichnungslayouts. Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fräsmarkierungen bilden einen Tiefenbereich von $300\text{ }\mu\text{m}$ (S355J2, *Hauptuntersuchungen*) bis $800\text{ }\mu\text{m}$ (S460N, *Hauptuntersuchungen*) ab. Die Geometrie von Fräsmarkierungen ist stark abhängig von der Beschaffenheit des eingesetzten Fräswerkzeuges. Diese existieren in einer Vielzahl von Ausprägungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein als ungünstig betrachtetes Fräswerkzeug mit einem konischen Fräskopf verwendet. Es kann davon ausgegangen werden, dass runde Fräsköpfe tendenziell zu höheren Ermüdungsfestigkeiten führen, wenngleich bei Fräsmarkierungen die Mikrostruktur der Oberfläche eine größere Rolle spielen kann. Die hier untersuchten Fräsmarkierungen weisen teilweise nicht unerhebliche Mikrorauigkeiten auf, welche den Ausgang für Ermüdungsrisse bilden können. Darüber hinaus kann auch davon ausgegangen werden, dass bereits der Fräsvorgang selbst Mikrorisse in das Material einbringt, welche sich dann infolge einer Ermüdungsbeanspruchung schneller aufweiten.

Stempelmarkierungen sind ähnlich wie Nadelmarkierungen in der Regel sehr definiert und entsprechen dem Negativ des eingesetzten Stempelwerkzeuges. Aufgrund der Tatsache, dass im Gegensatz zu Nadelmarkierungen meist mehrere Zeichen in einem Arbeitsgang geprägt werden, ist die benötigte Prägekraft im Vergleich deutlich größer. Dies ist der Grund, warum die Markierstempel in der Regel sehr scharf und spitz ausgebildet werden. Obwohl es bereits Be-

strebungen gibt, die Kerbschärfe zu verringern, weisen harte Stempelungen die höchste Kerbschärfe auf. Die im Rahmen dieser Untersuchungen ermittelten Markiertiefen liegen bei bis zu $1300\text{ }\mu\text{m}$ (*Voruntersuchungen*) und zeigen zudem vergleichsweise kleine Radien im Bereich des Kerbgrundes. Die Spannungskonzentration sollte sich daher bei Stempelmarkierungen im Vergleich zu den weiteren Markiermethoden am größten herausstellen.

Wie groß die Spannungskonzentrationen tatsächlich für die vorhandenen Geometrien ausfallen, kann zunächst nur qualitativ abgeschätzt werden, so dass zusätzlich Simulationen zur Bestimmung der Spannungserhöhung mithilfe von Finite Elemente Berechnungen durchgeführt wurden.

5 Einordnung geometrischer Einflüsse von Oberflächenkerben anhand numerischer Parameterstudien

5.1 Allgemeines

Der Einfluss der vier dauerhaften Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln wurde anhand umfangreicher Ermüdungsversuche für ausgewählte Markierparameter in Kapitel 3 ermittelt. Die Versuche haben bereits einen aussagekräftigen Einblick in das Ermüdungsverhalten infolge der eingebrachten Kerben geliefert. Zudem konnten teilweise deutliche Unterschiede im Ermüdungsverhalten sowie in den resultierenden Ermüdungsfestigkeiten festgestellt werden. Um die Frage zu klären, inwieweit die Geometrie und die Oberfläche einer durch eine der Kennzeichnungsmethoden hergestellten Formkerbe für die Ermüdungsfestigkeit verantwortlich ist und inwiefern sich die geometrischen Parameter für verschiedene Kennzeichnungsmethoden unterscheiden, wurden in Kapitel 4 anhand von mikroskopischen Untersuchungen 3D-Modelle untersucht, mit deren Hilfe typische geometrische Charakteristika herausgearbeitet werden konnten. Mithilfe dieser Daten war es bereits möglich, die verschiedenen Kerben infolge der Kennzeichnungsmethoden zu beschreiben, zu vergleichen und zu bewerten. Allerdings konnte bisher die Frage nicht hinreichend beantwortet werden, wie stark sich eine Änderung der Markierparameter und somit eine veränderte Formkerbe auf das Ermüdungsverhalten auswirkt.

Diese Frage soll durch die Ermittlung von Kerbspannungsfaktoren mithilfe von Finite Elemente Berechnungen geklärt werden. Anhand von Kerbspannungsfaktoren lässt sich eine Aussage über die Spannungserhöhung bei rein linear-elastischer Betrachtung infolge einer Formkerbe feststellen. Dabei sind Kerbspannungsfaktoren unabhängig von der Höhe der aufgebrachten Last und somit universell verwendbar.

Aufgrund der Tatsache, dass Kerbspannungsfaktoren rein fiktiv auf Basis linear-elastischer Berechnungen bestimmt werden, werden anschließend auf Basis real plastischer Simulationen (Mikrostützwirkung) die ermittelten Kerbspannungs-

faktoren eingeordnet und durch die Bestimmung von Kerbwirkungszahlen korrigiert.

Im Rahmen der vorgestellten Berechnungen wurde sich auf den Einfluss der geometrischen Ausprägungen der Kerben beschränkt. Weitere Einflüsse, wie mögliche Druckeigenstressungen sowie Gefügeveränderungen durch thermische Prozesse, wurden nicht berücksichtigt.

5.2 Definition des Kerbspannungsfaktors

Geometrische Kerben in Bauteilen rufen eine Spannungskonzentration hervor, deren Spannungsüberhöhung sich im Vergleich zur Nennspannung über den Kerbspannungsfaktor K_t definiert. Der Kerbspannungsfaktor, auch bekannt als Spannungskonzentrationsfaktor, Kerbformzahl oder Kerbfaktor α_k , beschreibt das Verhältnis aus maximal vorhandener Spannung infolge der Kerbe zur Nennspannung im anliegenden Nettoquerschnitt oder im benachbarten Bruttoquerschnitt, siehe auch [8, 26–30].

$$K_t = \alpha_k = \frac{\sigma_{k,max}}{\sigma_n} \quad (5.1)$$

Der Spannungskonzentrationsfaktor ist im Wesentlichen abhängig von der geometrischen Ausprägung der betrachteten Kerbe. Der Kerbspannungsfaktor ist ein Kennwert unter Berücksichtigung eines rein linear-elastischen Materialverhaltens und somit unabhängig von der Höhe der aufgebrachten Kraft. Allerdings ist K_t von der Belastungsart abhängig. Bei gleicher Probengeometrie ergeben sich so für Zug-, Biege- oder Torsionsbeanspruchung unterschiedliche Spannungskonzentrationsfaktoren.

Für Ermüdungsprobleme ist neben dem eigentlichen Spannungshöchstwert im Bereich der Kerbe $\sigma_{k,max}$ auch der Spannungsgradient von Bedeutung. Mithilfe des Spannungsgradienten senkrecht zur Kerboberfläche ausgehend von $\sigma_{k,max}$ können mögliche Stützeffekte des Materials berücksichtigt werden, siehe auch [31–48].

Ferner ist die Rissinitiierungsphase stark abhängig von der Höhe der Kerbformzahl. Je größer K_t , desto schneller wird ein Riss in das Bauteil eingeleitet. Für eine hohe Lebensdauer ist somit in der Konstruktionsphase die vorhandene Kerbschärfe zu optimieren. Im Bereich der Kennzeichnungen im Stahlbau

sind die Geometrien und somit die Spannungskonzentrationsfaktoren durch die entsprechenden Markiermaschinen nicht gänzlich frei wählbar, wenngleich die Maschinenhersteller Bestrebungen zeigen, die Kerbschärfe zu minimieren, siehe auch Abb. 2.9.

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Tafelwerten und Berechnungsgrundlagen für Kerbspannungsfaktoren, siehe u.a. [28, 30], auf die hier aber nicht näher eingegangen wird. Für komplexe Geometrien oder eine gezieltere Betrachtung empfiehlt sich eine Modellierung und Bestimmung mittels der Methode der Randwerte-Elemente-Methode oder der Finite-Elemente-Methode (FEM), welche auch im Rahmen dieser Arbeit Anwendung findet. Ein funktionsfähiges und kalibriertes FE-Modell kann ebenfalls für weitere Analysen verwendet werden, weshalb dieser Ansatz verfolgt wird. Mit einem existierenden Modell besteht zum einen die Möglichkeit, einen fiktiven Kerbspannungsfaktor mit tatsächlichen, im Bauteil auftretenden Spannungen anhand von ermittelten Materialgesetzen zu vergleichen, zum anderen bietet sich die Möglichkeit, die Kerben infolge der Kennzeichnungsmethoden mit realen, nicht idealisierten Geometrien abzubilden, was im Rahmen zukünftiger Untersuchungen durchzuführen wäre.

5.3 Idealisierung der Oberflächenkerben zur Modellbildung

Um die Kerbspannungsfaktoren im Rahmen von FE-Berechnungen für ausgewählte Kerbdetails bestimmen zu können, sind neben den in Kapitel 4 ermittelten Kerbtiefen und qualitativen geometrischen Parametern definierte Eingangsgrößen zu bestimmen, mit denen die Kerben infolge der Kennzeichnungsmethoden idealisiert beschrieben werden können. Hierzu wurden die Parameter Kerbtiefe (t_k), Kerbradius (r_k) sowie Öffnungswinkel (α_k) anhand der in Kapitel 4 ermittelten Querschnitte bestimmt, siehe auch Abb. 5.1 und Abb. 5.2. Die Ermittlung der Parameter ist für alle Kennzeichnungsmethoden exemplarisch in Anhang A enthalten.

In der Regel ließen sich die geometrischen Parameter eindeutig aus den vorhandenen Querschnitten ableiten. Darüber hinaus waren die Unterschiede zwischen verschiedenen Prüfkörpern einer Kennzeichnungsmethode grundsätzlich als vernachlässigbar einzustufen. Daher sind im Rahmen der Bestimmung der geometrischen Parameter lediglich stichprobenartige Messungen dokumentiert.

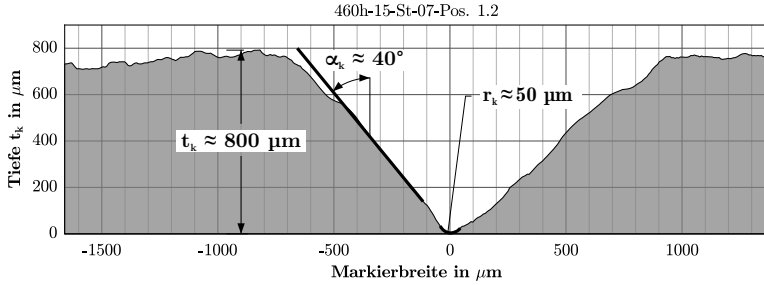


Abb. 5.1 Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der *Hauptuntersuchungen* als Eingangsgrößen für die FE-Berechnungen

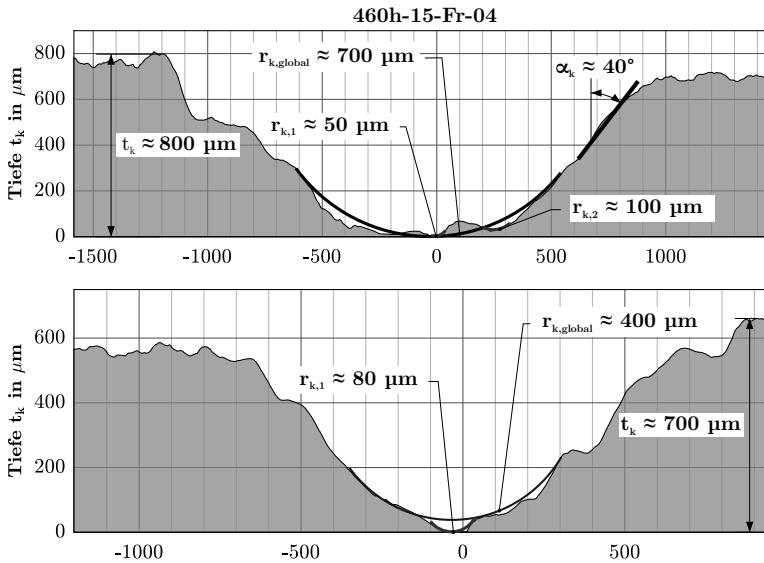


Abb. 5.2 Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der *Hauptuntersuchungen* aus S460N als Eingangsgrößen für die FE-Berechnungen

Insbesondere bei gefrästen Markierungen an Prüfkörpern der Stahlsorte S460N ergaben sich jedoch teilweise deutlich abweichende Größen, weshalb hier eine mögliche Spannweite der ungünstigsten Ausprägungen dokumentiert wurde. Die Markiertiefen bewegen sich zwischen ca. $600\ \mu\text{m}$ und $800\ \mu\text{m}$. Insbesondere die Radien sind in diesem Fall jedoch von Interesse. Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, entsteht durch die gefrästen Markierungen eine vergleichsweise raue Oberfläche, welche sich deutlich von allen weiteren Kennzeichnungsmethoden abhebt. Diese

lässt sich besonders bei der Ermittlung eines idealisierten Kerbradius feststellen. Während sich durch die Fräsmarkierungen ein verhältnismäßig großer globaler Kerbradius, vergleichbar mit Plasmamarkierungen, einstellt, sind besonders im Kerbgrund lokale Mikrokerben zu finden, welche einen deutlich kleineren Radius aufweisen. Diese Mikrokerben sind gut in Abb. 5.2 zu erkennen und sollten bei einer Idealisierung der Oberflächenkerben berücksichtigt werden.

Die ermittelten idealisierten Parameter zur Beschreibung der Oberflächenkerben infolge dauerhafter Kennzeichnungen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Hierbei handelt es sich um die in den unterschiedlichen Messungen ermittelten Extremalwerte. Die Werte beruhen auf den in Abb. 5.1, Abb. 5.2 und Anhang A exemplarisch dargestellten Messungen, können aber von den dort gezeigten Werten abweichen.

Tab. 5.1 Größenordnungen geometrischer Parameter untersuchter Oberflächenkerben infolge dauerhafter Kennzeichnungsmethoden

Methode	$\frac{t_k}{\mu\text{m}}$	$\frac{\alpha_k}{\mu\text{m}}$	$\frac{r_k}{\mu\text{m}}$
Hauptuntersuchungen			
Stempeln	800	40 – 50	40 – 70
Fräsen S355	350	60 – 70	50 – 150
Fräsen S460	800	40 – 50	80 – 100 (700) ^a
Plasma	700	40 – 50	400 – 1000
Nadeln	350	40 – 50	350
Voruntersuchungen			
Stempeln	1300	40 – 50	70 – 150
Fräsen	500	–	30 – 80 (1500) ^a
Plasma	1300	10 – 20	400
Nadeln	300	40 – 50	300
^a Werte in Klammern entsprechen global ermittelten Radien unter Vernachlässigung von Mikrokerben			

5.4 FE-Modellierung

5.4.1 Modellaufbau und -parameter

Für die FE-Modellierung der Oberflächenkerben wurde ein dreidimensionales parametrisiertes Modell mit idealisierten Kerbgeometrien erstellt. Das komplette Modell umfasst einen Blechstreifen als Grundmaterial mit einer zu den in Kapitel 3 untersuchten Prüfkörpern identischen Breite von $b_{gk} = 60$ mm sowie eine

senkrecht zur Krafrichtung verlaufende gerade Kerbe, welche an den Enden ausläuft, siehe Abb. 5.3. Die Länge des Blechstreifens wurde mit $l_{gk} = 70 \text{ mm}$ ausreichend groß gewählt, um den Versuchskörper abzubilden. Die Blechdicke t_{gk} wurde für die Berechnungen entsprechend der Blechdicken im Rahmen der experimentellen Untersuchungen variiert.

Für die FE-Berechnungen wurde die Symmetrie des 3D-Modells ausgenutzt, sodass nur die Hälfte des eigentlichen Prüfkörpers modelliert wurde. Das parametrisierte Modell wurde mit der 3D-CAD-Software Autodesk Inventor in Version 2017 [49] erstellt, alle Berechnungen erfolgten mit der Simulationsumgebung ANSYS Workbench in Version 17.2 [50].

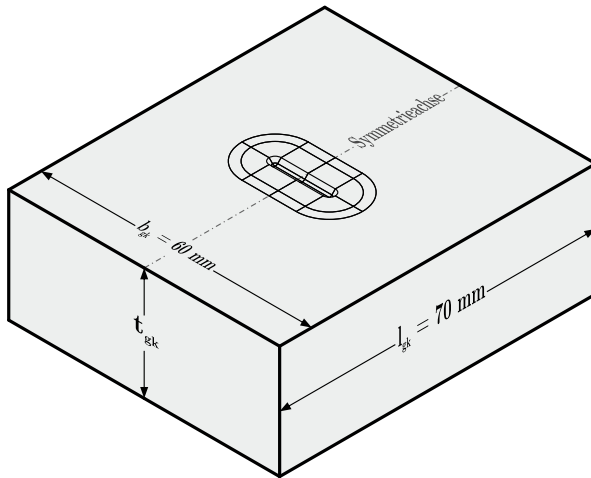


Abb. 5.3 Grundsätzlicher Aufbau des FE-Modells zur Ermittlung von Kerbspannungsfaktoren

Die Geometrie der Oberflächenkerbe wurde dabei idealisiert abgebildet, siehe Abb. 5.4. Prinzipiell ist die Form der abgebildeten idealisierten Oberflächenkerbe abhängig von drei Größen. Die Tiefe der Kerbe wird über den Parameter t_k gesteuert. Der Radius im Kerbgrund wird separat von der Tiefe über den Parameter r_k eingestellt. Schließlich kann noch der Öffnungswinkel mit dem Parameter α_k angepasst werden. Mit diesen drei Parametern lassen sich grundsätzlich alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kerbgeometrien idealisiert abbilden, wobei die Mikrokerben der Fräsmarkierung nicht unmittelbar berücksichtigt

werden können. Anstelle dessen können aber die lokalen kleinen Kerbradien berücksichtigt werden, indem der Kerbradius r_k entsprechend angepasst wird.

Die Länge der eingebrachten Kerbe betrug in der Regel $l_k = 12 \text{ mm}$ und entsprach damit der kleineren der in Kapitel 3 planmäßig untersuchten Schriftzeichenhöhe. Da die Nadelmarkierungen in Form einzelner, abgegrenzter Punkte ausgebildet werden, wurde in der Modellierung dementsprechend für Nadelmarkierungen eine runde Kerbe erstellt, siehe Abb. 5.5.

Für die Berechnung wurde im Bereich um die Kerbe ein strukturiertes Netz angelegt, Abb. 5.6. Die Bereiche unmittelbar um die Kerbe wurden für die Vernetzung in vier Teilbereiche unterteilt. Die Größe, Anzahl und Länge der Elemente wurde für die Bereiche (1) und (2) untereinander abhängig definiert. Zusätzlich wurde die Größe der Bereiche des strukturierten Netzes an die Kербгеометrie angepasst. Für die Bereiche (1) und (2) wurde eine Tiefe von ca. $4 \cdot t_k$ gewählt, für die äußeren Bereiche (3) und (4) wurde eine Minstdicke von $2 \cdot t_k$ definiert. Die Vernetzung in allen vier Bereichen wurde mit einem 20-knotigen Hexaeder-Element des Typs SOLID186 erstellt, siehe Abb. 5.7.

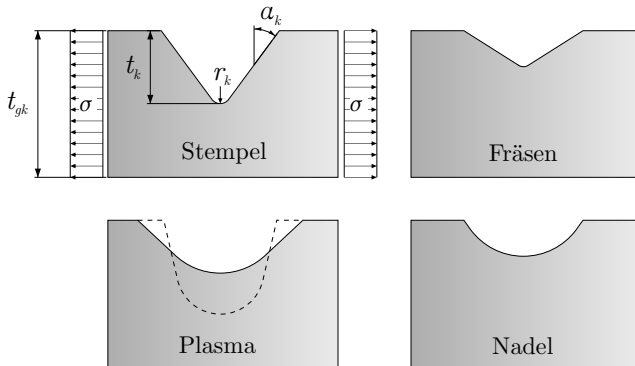


Abb. 5.4 Parameter zur Modellierung idealisierter Oberflächenkerben zur Berechnung von Kerbspannungsfaktoren

5.4.2 Konvergenz

Die Parameter zur Steuerung des Netzes unmittelbar um die Kerbe (Bereiche 1 und 2) können Abb. 5.8 entnommen werden. Für die Steuerung der Vernetzung wurden folgende Parameter definiert:

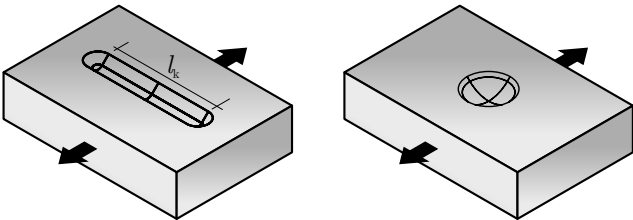


Abb. 5.5 Vergleich der für die FE modellierten Kербгеометrien für Stempel-, Fräs-, und Plasmamarkierungen (links) sowie Nadelmarkierungen (rechts)

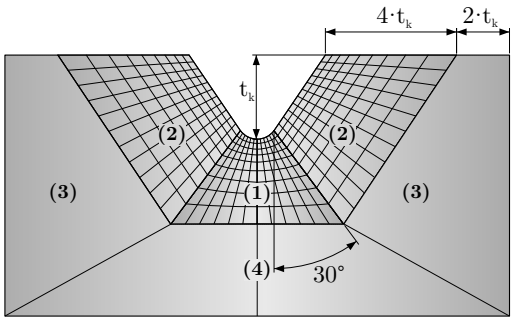


Abb. 5.6 Darstellung der für die Vernetzung des FE-Modells erstellten vier Bereiche um die Oberflächenkerbe zur strukturierten Vernetzung

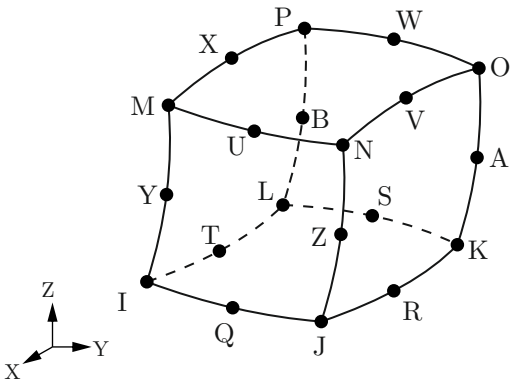


Abb. 5.7 Darstellung des für FE-Berechnung verwendeten 20-knotigen Elements SOLID186 nach [50]

- $el_{w,k}$ beschreibt die Elementkantenlänge entlang der Wangenfläche der Kerbe.
- $el_{r,k}$ beschreibt die Elementkantenlänge entlang des Radius der Kerbe.
- $el_{t,k}$ bezeichnet die durchschnittliche Elementkantenlänge normal zum Kerbgrund, wobei zur Oberfläche der Kerbe hin ein Verdichtungsfaktor von 5 angesetzt wurde, sodass die Elementkantenlänge unmittelbar unter der Oberfläche 1/5 der Elementkantenlänge am unteren Ende des Bereichs 1 beträgt.
- $n_{w,k}$ bezeichnet die Anzahl der Elemente entlang der Kerbwange.
- $n_{r,k}$ bezeichnet die Anzahl der Elemente entlang des Kerbradius.
- $n_{t,k}$ ist die Anzahl der Elemente normal zur Oberfläche der Kerbe.
- $n_{l,k}$ beschreibt die Anzahl der Elemente in Längsrichtung der Kerbe ohne Berücksichtigung des Auslaufs.

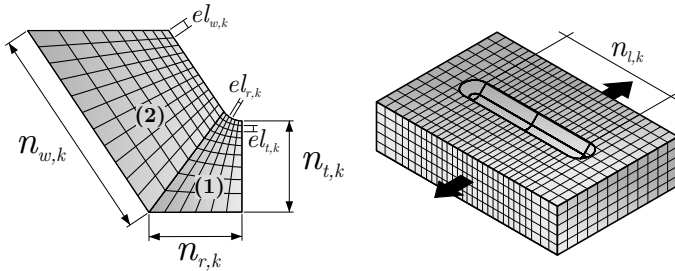


Abb. 5.8 Übersicht der Parameter zur Steuerung der Vernetzung des FE-Modells im unmittelbaren Bereich der Kerbe. Mit: n = Elementanzahl; el = Elementkantenlänge

Die Konvergenz des erstellten FE-Modells wurde anhand von drei unterschiedlichen Kerbgeometrien untersucht. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass eine ausreichend große Netzdichte für die verschiedenen untersuchten Geometrien realisiert wurde. Darüber hinaus wurde die benötigte Elementanzahl in Längsrichtung der Kerbe gesondert untersucht. Hier wurde davon ausgegangen, dass die benötigte Elementanzahl verhältnismäßig klein ist, da der erwartete Spannungsgradient in Längsrichtung der Kerbe im Gegensatz zur Lastrichtung vergleichsweise klein ist. Die Konvergenz des Modells wurde als ausreichend bewertet, wenn der Unterschied der bestimmten Hauptspannungen für die gewählte Netzdichte um weniger als zwei Prozent von der Hauptspannung der

nächstgrößeren untersuchten Netzdichte abweicht. Das spätere Modell sollte über die Elementanzahl normal zur Kerboberfläche $n_{t,k}$ gesteuert werden. Zur Bestimmung der Konvergenz wurden folgende Konfigurationen untersucht:

- (a) Eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm und einem Öffnungswinkel $\alpha_k = 40^\circ$.
- (b) Eine Kerbe der Tiefe $t_k = 0,2$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,05$ mm und einem Öffnungswinkel $\alpha_k = 40^\circ$.
- (c) Eine Kerbe der Tiefe $t_k = 3,0$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm und einem Öffnungswinkel $\alpha_k = 40^\circ$.
- (d) Eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm, einem Öffnungswinkel $\alpha_k = 40^\circ$ und einer Länge $l_k = 6$ mm, bei der die Anzahl der Elemente in Längsrichtung der Kerbe variiert wurde.

Die Bestimmung der Mindestanzahl der Elemente in Längsrichtung der Kerbe erfolgte exemplarisch anhand einer Kerbgeometrie. Die Blechdicke im Rahmen der Berechnungen zur Konvergenz betrug $t_{gk} = 25$ mm. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der Modellkonvergenz sind in den Abbildungen 5.9 bis 5.12 zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die Abweichung der maximalen Hauptspannung innerhalb der Kerbe zum vorherigen Wert in Prozent über die betrachtete Elementanzahl.

Konfiguration (a) In Abb. 5.9 sind die Ergebnisse für Kerbgeometrie (a) dargestellt. Für diese Geometrie wurden vier unterschiedliche Elementgrößenverhältnisse auf Konvergenz untersucht. Variiert wurden das Verhältnis zwischen der Elementkantenlänge im Bereich der Wangenfläche der Kerbe $el_{w,k}$ zur Elementkantenlänge im Kerbradius $el_{r,k}$. Zusätzlich wurde jeweils die Elementanzahl in Längsrichtung der Kerbe $n_{l,k}$ untersucht. Diese war für eine Konfiguration gleich der Elementanzahl im Kerbradius $n_{r,k}$, in der zweiten Konfiguration wurde ein fester Wert $n_{l,k} = 10$ angesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle untersuchten Parameterpaarungen die Abweichung der maximalen Hauptspannung zum vorherigen Wert bei einer Elementanzahl normal zur Kerboberfläche von $n_{t,k} \approx 40 - 50$ unter zwei Prozent liegt. Höhere Netzdichten liefern nur unwesentlich abweichende Ergebnisse.

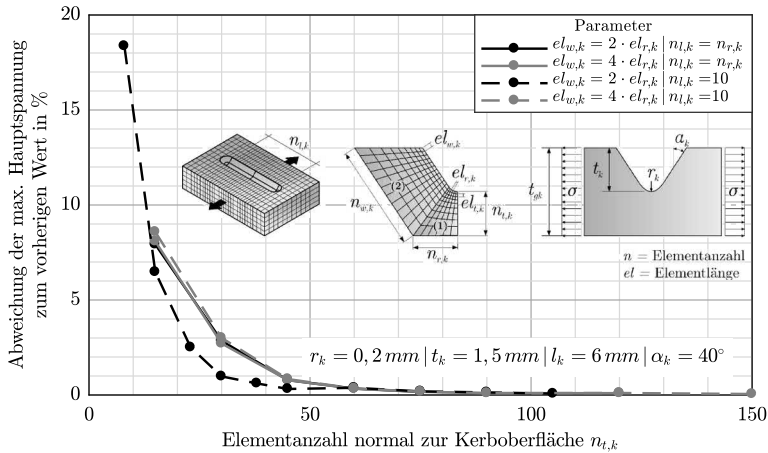


Abb. 5.9 Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5 \text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2 \text{ mm}$ anhand verschiedener Netzdichten und -verhältnisse

Konfiguration (b) Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Konvergenz des FE-Modells für Kerbgeometrie (b) sind in Abb. 5.10 dargestellt. Auf Basis der Ergebnisse in Abb. 5.9 wurde hier nur eine Konfiguration des Netzdichtenverhältnisses untersucht. Die Elementkantenlänge in der Wangenfläche der Kerbe war viermal so groß wie die Elementkantenlänge im Kerbradius. Die Elementanzahl in Längsrichtung der Kerbe betrug $n_{l,k} = 10$. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits ab einer Elementanzahl von $n_{t,k} = 15$ die Abweichung zur vorher ermittelten relevanten Hauptspannung mit 1,7% deutlich kleiner als zwei Prozent ist.

Konfiguration (c) Die dritte Studie zur Konvergenz wurde entsprechend Konfiguration (c) mit einer Kerbtiefe von $t_k = 3,0 \text{ mm}$ und einem Kerbradius von $r_k = 0,2 \text{ mm}$ durchgeführt, siehe Abb. 5.11. Wie bereits in Abb. 5.9 wurden auch hier verschiedene Netzdichtenverhältnisse abgebildet. Zum einen wurde Länge der Kerbe variiert, zum anderen das Verhältnis zwischen der Elementkantenlänge im Bereich der Wangenfläche sowie normal zur Kerboberfläche und der Elementkantenlänge im Kerbradius. Hiermit wurde überprüft, ob für eine ausreichende Konvergenz die Gesamtelementanzahl minimiert werden konnte. Die Ergebnisse zeigen, dass für alle untersuchten Konfigurationen die Abweichung der Hauptspannung zum vorherigen Wert bei einer Elementanzahl normal zur

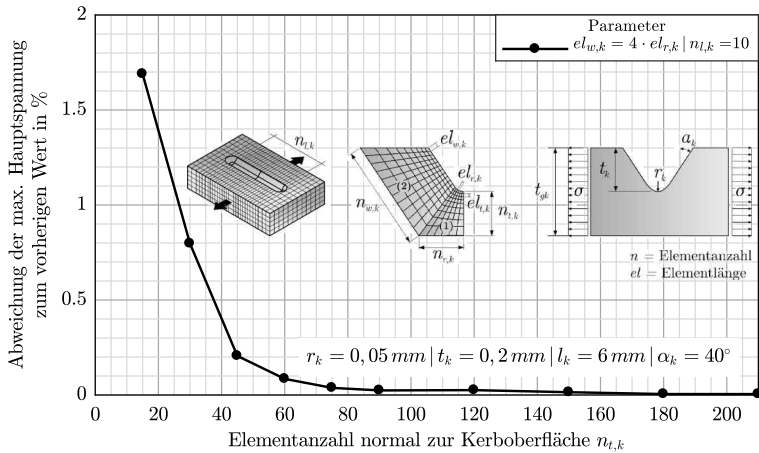


Abb. 5.10 Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 0,2 \text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 0,05 \text{ mm}$

Kerboberfläche von $n_{t,k} = 60$ unter zwei Prozent liegt. Höhere Netzdichten liefern nur unwesentlich abweichende Ergebnisse.

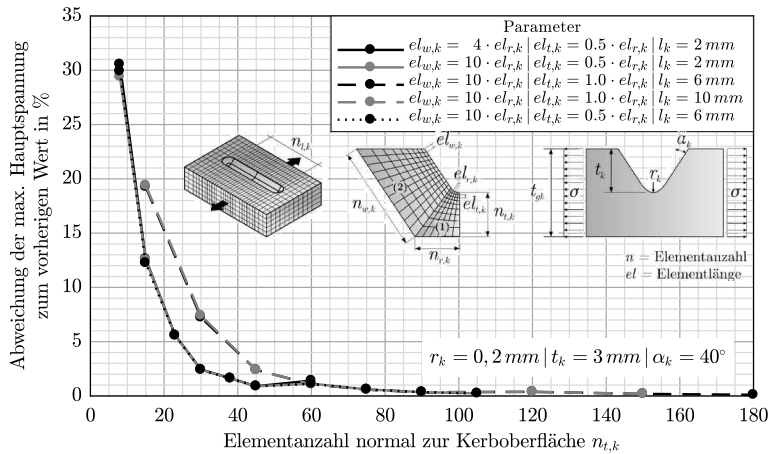


Abb. 5.11 Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 3 \text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2 \text{ mm}$ anhand verschiedener Netzdichten und -verhältnisse

Konfiguration (d) Neben der Konvergenz für verschiedene Kerbgeometrien wurde zusätzlich untersucht, wieviele Elemente in Längsrichtung der Kerbe $n_{l,k}$ für eine ausreichend genaue Berechnung benötigt werden, siehe Abb. 5.12. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits im ersten Iterationsschritt für eine Elementanzahl von $n_{l,k} = 10$ Elemente die Abweichung der betrachteten maximalen Hauptspannung zur initial untersuchten Elementanzahl von $n_{l,k} = 4$ kleiner einem Prozent liegt. Aufgrund des sehr kleinen Spannungsgradienten in Längsrichtung der Kerbe, also normal zur Belastungsrichtung, spielt die Elementanzahl in dieser Richtung eine untergeordnete Rolle. Somit kann die benötigte Gesamtanzahl der eingesetzten Elemente deutlich reduziert werden. Für die weiteren Untersuchungen wurden 12 Elemente berücksichtigt, so dass für eine Kerbe mit einer Länge von $l_k = 12\text{ mm}$ die Elementkantenlänge $el_{l,k} = 1\text{ mm}$ betrug.

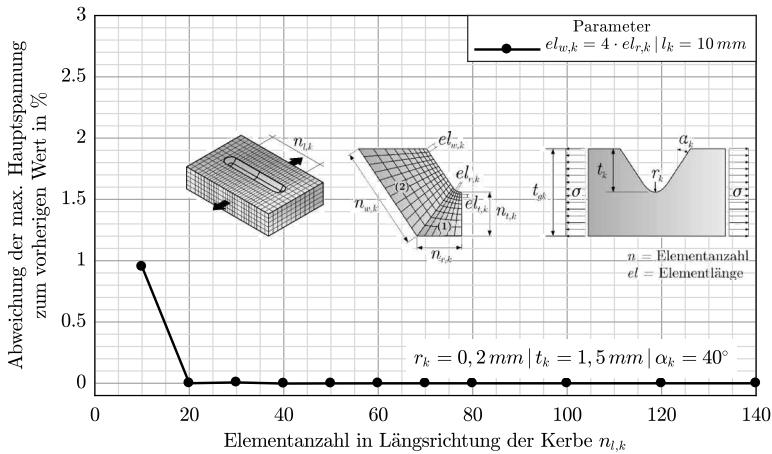


Abb. 5.12 Überprüfung der Konvergenz des FE-Modells für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5\text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 0,2\text{ mm}$ unter Variation der Elementanzahl in Längsrichtung der betrachteten Kerbe

Zusammenfassung Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Konvergenz haben gezeigt, dass für die gewählten Verhältnisse der Elementeteilungen innerhalb des erstellten Modells zwischen 20 und 60 Elemente normal zur Kerboberfläche benötigt werden, um ausreichend genaue Ergebnisse zu erhalten. Je tiefer die Kerbe, desto mehr Elemente werden benötigt, um die Genauigkeit zu erhalten. Für die weiteren Untersuchungen zur Bestimmung der Kerbspannungsfaktoren

wird einheitlich eine Elementanzahl normal zur Kerboberfläche von $n_{t,k} = 60$ gewählt, wenngleich besonders für kleine Kerbgeometrien weniger Elemente ausreichend wären. Eine Elementanzahl von $n_{t,k} = 60$ liefert eine Elementanzahl im Kerbradius von $n_{r,k} \approx 15$.

Die Elementanzahl in Längsrichtung der Kerbe $n_{l,k}$ spielt aufgrund des kleinen Spannungsgradienten normal zur Belastungsrichtung eine untergeordnete Rolle.

5.5 Kerbspannungsfaktoren

5.5.1 Allgemeines

Die Bestimmung der Kerbspannungsfaktoren für durch die dauerhaften Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln in das Bauteil eingebrachten idealisierten Oberflächenkerben hilft bei der Einschätzung der Auswirkungen dieser Kerben auf die Ermüdungsfestigkeit. So können die Ergebnisse sowohl der Ermüdungsversuche in Kapitel 3 sowie der Bestimmung der geometrischen Charakteristika in Kapitel 4 eingeordnet und beurteilt werden. Kerbspannungsfaktoren sind belastungsunabhängige Faktoren, da sie mit linear-elastischem Materialgesetz berechnet werden. Sie haben somit auch für unterschiedliche Materialien Gültigkeit. Zur Bestimmung der Kerbspannungsfaktoren wurden zunächst neben den vermuteten Haupteinflussfaktoren Kerbtiefe t_k und Kerbradius r_k weitere Parameter, wie der Öffnungswinkel der Kerbe α_k , die Blechdicke t_{gk} und die Länge der Kerbe l_k untersucht. Für die Berechnung der Kerbformzahlen wurde die Nennspannung im Bruttoquerschnitt als Bezugsgröße herangezogen. Im Rahmen der Ermittlung der Kerbspannungsfaktoren galt es folgende Fragen zu beantworten:

- (a) Welchen Einfluss hat eine veränderte Blechdicke auf die Höhe des Kerbspannungsfaktors sowie auf den Spannungsgradienten?
- (b) Welchen Einfluss hat die Länge der eingebrachte Kerbe auf die Höhe des Kerbspannungsfaktors?
- (c) Welchen Einfluss haben die Parameter Kerbtiefe t_k , Kerbradius r_k und Öffnungswinkel α_k auf die Höhe des resultierenden Kerbspannungsfaktors?

5.5.2 Einfluss des Öffnungswinkels

Zunächst wurde untersucht, welchen Einfluss der Öffnungswinkel einer Kerbe α_k auf den Kerbspannungsfaktor ausübt. Hierzu wurden an einer exemplarischen Kerbgeometrie mit einer Kerbtiefe von $t_k = 0,5 \text{ mm}$ und einem Kerbradius von $r_k = 0,2 \text{ mm}$ Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Öffnungswinkels α_k der Kerbe ermittelt. Die ermittelten Faktoren sind in Abb. 5.13 dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass sich der Kerbfaktor für einen Öffnungswinkel α_k zwischen 5° und 50° nicht ändert. Für die vorliegende Konfiguration resultiert eine linear-elastische Spannungserhöhung um ca. den Faktor $K_t = 3,15$. Die Differenz zwischen dem Kerbfaktor $K_t(50^\circ)$ und $K_t(60^\circ)$ ist ebenfalls als vernachlässigbar einzustufen. Ein erster Abfall des Kerbfaktors zeigt sich erst bei einem Öffnungswinkel von 70° mit einem Kerbspannungsfaktor von $K_t = 2,9$. Nichtsdestotrotz ist der Einfluss des Öffnungswinkels auf den Kerbfaktor für die ermittelten Winkel der idealisierten Kerben als vernachlässigbar einzustufen. Hieraus wird geschlossen, dass für die relevanten Kerbgeometrien keine weitere Differenzierung hinsichtlich des Öffnungswinkels getroffen werden muss.

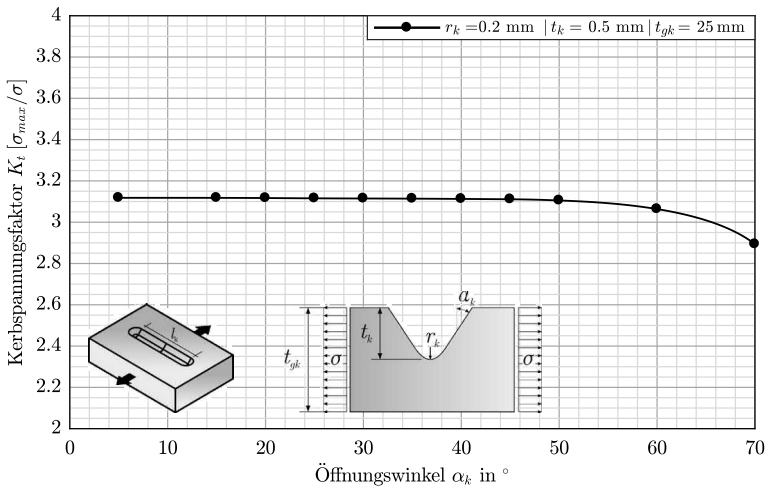


Abb. 5.13 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Öffnungswinkels α_k der betrachteten Kerbe

5.5.3 Einfluss der Blechdicke

Um den Einfluss einer veränderten Blechdicke des Grundmaterials t_{gk} auf den Kerbspannungsfaktor zu untersuchen, wurden Berechnungen anhand verschiedener Kerbgeometrien durchgeführt. Hierzu wurden sowohl für unterschiedliche Kerbtiefen t_k als auch für unterschiedliche Kerbradien r_k Kerbspannungsfaktoren unter Berücksichtigung von drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm bestimmt. Die Ergebnisse der Berechnungen können Abb. 5.14 und Abb. 5.15 entnommen werden. In Abb. 5.14 sind für vier Kerbtiefen 0,3 mm, 0,5 mm, 1 mm sowie 1,5 mm Kerbspannungsfaktoren berechnet worden. Der entsprechende Radius im Kerbgrund betrug $r_k = 0,2$ mm. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Kerbspannungsfaktoren faktisch für unterschiedliche Blechdicken nicht unterscheiden. Es werden quasi identische Ergebnisse erzielt.

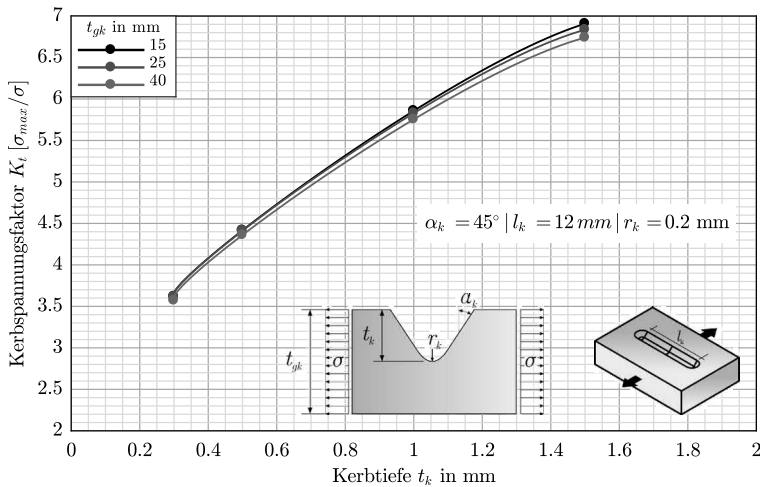


Abb. 5.14 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Blechdicken t_{gk}

Neben einer variierenden Kerbtiefe t_k in Abb. 5.14 wurden in Abb. 5.15 Kerbspannungsfaktoren für unterschiedliche Kerbradien einer 1 mm tiefen Kerbe bestimmt. Die Ergebnisse liefern ebenfalls identische Kerbspannungsfaktoren für alle drei Blechdicken. Es wird vermutet, dass aufgrund der vergleichsweise großen Blechdicken die Nennspannung im Nettoquerschnitt bereits in einer vergleichsweise

geringen Tiefe unterhalb der Kerbe erreicht wird, so dass die Blechdicke keinen Einfluss auf den Kerbfaktor hat.

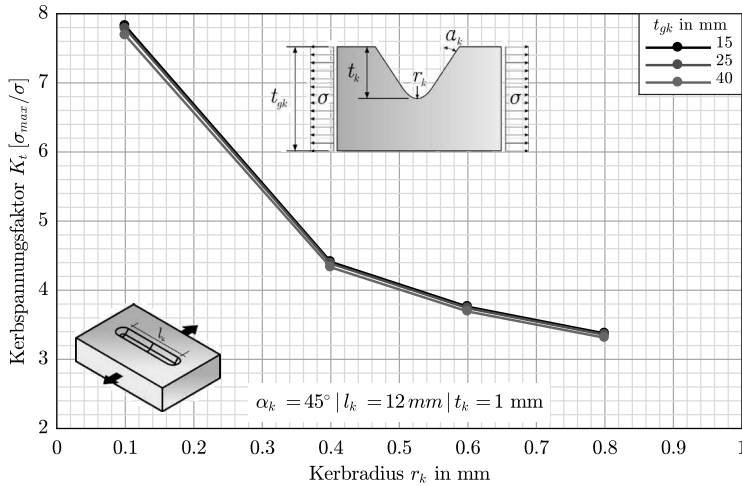


Abb. 5.15 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Kerbradius r_k für unterschiedliche Blechdicken t_{gk}

Um dies zu prüfen, wurden ebenfalls die Spannungsgradienten normal zur Kerboberfläche für exemplarische Geometrien bestimmt und miteinander verglichen, siehe Abb. 5.16 und Abb. 5.17.

Die jeweiligen Kurven sind zur besseren Übersichtlichkeit jeweils um 0,5 mm auf der X-Achse verschoben. Die Verläufe der Spannungen normal zur Kerboberfläche sind bei gleichen Markiergeometrien identisch. Bemerkenswert ist, dass bei beiden Kerbgeometrien die Nennspannung bereits in einer Tiefe von $z \approx 3 \text{ mm}$ erreicht wird. Ab dieser Tiefe liegt quasi keine Störung des Grundmaterials infolge der Kerbe mehr vor. Aufgrund der großen Blechdicken im Verhältnis zur Kerbtiefe kann im Allgemeinen auch von flachen Kerben ausgegangen werden, da diese die Spannungsverteilung lediglich lokal im Bereich der Kerbe beeinflussen, siehe auch [28]. Daraus kann gefolgert werden, dass für die betrachteten Blechdicken kein nennenswerter Unterschied hinsichtlich der Spannungserhöhung vorliegt, bei kleinen Blechdicken jedoch durchaus ein Effekt auf die Blechdicke zu erwarten ist. Für die weiteren Berechnungen wird keine weitere Differenzierung hinsichtlich

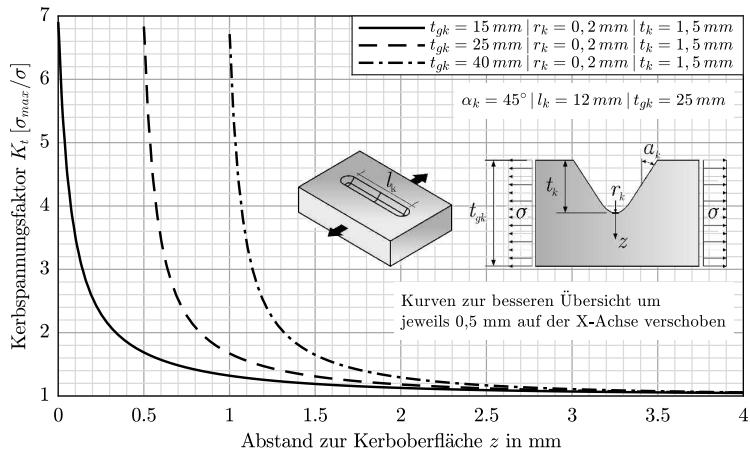


Abb. 5.16 Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5\text{ mm}$ und eines Kerbradius $r_k = 0,2\text{ mm}$ für verschiedene Blechdicken

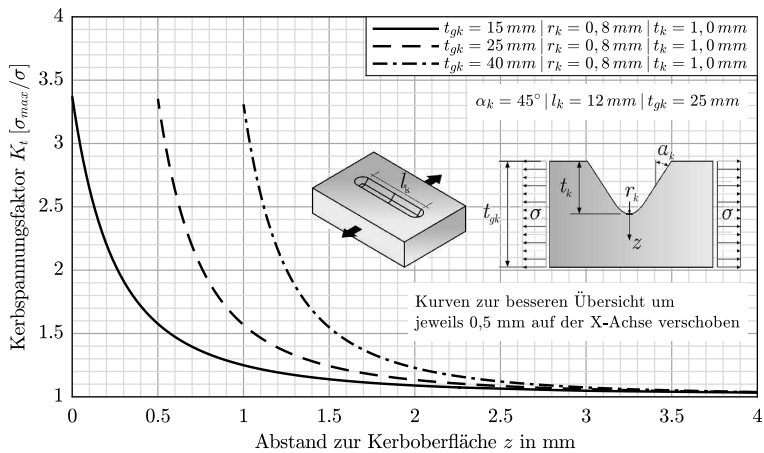


Abb. 5.17 Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,0\text{ mm}$ und eines Kerbradius $r_k = 0,8\text{ mm}$ für verschiedene Blechdicken

der Blechdicke vorgenommen, da für die gegebenen Geometrien kein Unterschied erkennbar ist.

5.5.4 Einfluss der Länge der Kerbe

Die Länge einer Kennzeichnung und somit die Länge einer Oberflächenkerbe senkrecht zur Belastungsrichtung kann durchaus einen Einfluss auf die Höhe der örtlichen Spannungskonzentration haben. Obwohl sich während der experimentellen Untersuchungen in Kapitel 3 der Einfluss unterschiedlicher Schrift Höhen nicht bestätigte, da Ermüdungsrisse nicht durchgängig von den größeren Schriftzeichen ausgingen, sollte anhand der FE⁴ Berechnungen überprüft werden, inwiefern sich ein Einfluss der Kerblänge auf den Kerbspannungsfaktor darstellt. Die Ergebnisse der Berechnungen für eine exemplarische Kerbgeometrie mit einer Tiefe von $t_k = 1,5$ mm und einem Kerbradius von $r_k = 0,2$ mm sind Abb. 5.18 zu entnehmen.

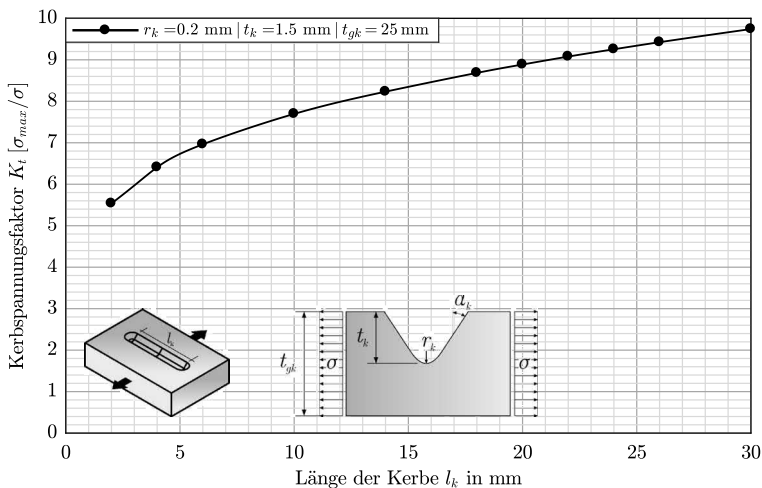


Abb. 5.18 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Länge der betrachteten Kerbe l_k

Für die gegebene Geometrie zeigt sich ein teilweise deutlicher Einfluss. Bei einer betrachteten Querschnittsbreite von $b_{gk} = 60$ mm führt eine Erhöhung der Kerblänge von 2 mm auf 30 mm zu einer Erhöhung der elastischen Kerbspannung

um den Faktor 1,75. Die Betrachtung praxisnäherer Größen liefert allerdings auch geringere Unterschiede. Die in Kapitel 3 untersuchten Schrifthöhen führen bei der Reduzierung auf eine einzelne gerade und idealisierte Kerbe zu einer Spannungserhöhung von lediglich

$$\frac{K_t(18 \text{ mm}) - K_t(12 \text{ mm})}{K_t(12 \text{ mm})} = \frac{8,7 - 8}{8} = 8,8 \, \%.$$

Die weiteren Untersuchungen beschränken sich daher auf eine festgelegte Kerblänge. Unter Berücksichtigung der Geometrien aus Kapitel 3 und Kapitel 4 wird eine Kerblänge von $l_k = 12 \text{ mm}$ angesetzt. Diese entspricht der Schrifthöhe eines Großteils der durchgeführten Ermüdungsversuche.

5.5.5 Nadelmarkierungen

Nadelmarkierungen setzen sich in der Regel aus punktförmigen voneinander abgegrenzten Einzelkerben zusammen. Da sich bereits ein Einfluss der Länge einer Kerbe auf die Kerbspannungsfaktoren gezeigt hat, werden im folgenden Kerbformzahlen für punktförmige, runde Kerben ermittelt. Die Ergebnisse der FE-Simulationen sind in Abb. 5.19 dargestellt.

Untersucht wurden vier für Nadelmarkierungen annehmbare Kerbtiefen t_k in Abhängigkeit variierender Kerbradien von $r_k = 0,04 - 1,0 \text{ mm}$. Bemerkenswert ist, dass die Kerbfaktoren deutlich kleiner ausfallen, siehe Abb. 5.18. Für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Nadelmarkierungen mit Kerbtiefen von ca. $t_k \approx 0,4 \text{ mm}$ und Kerbradien von ca. $r_k \approx 0,3 \text{ mm}$ ergeben sich Spannungskonzentrationsfaktoren von ca. $K_t = 2,1 - 2,3$. Geht man davon aus, dass Kerbfaktoren $K_t > 5$ als versagensrelevant und Faktoren $K_t < 2,5$ im Allgemeinen als unkritisch betrachtet werden, siehe auch [51], können die Nadelmarkierungen hinsichtlich ihrer Geometrie als unkritisch eingestuft werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass jeweils lediglich ein einzelner Markierpunkt untersucht wurde. Welchen Einfluss mehrere normal zur Belastungsrichtung angeordnete punktförmige Kerben auf den ermittelten Kerbfaktor haben, wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt und ist zudem davon abhängig, welchen Abstand die Punkte zueinander aufweisen.

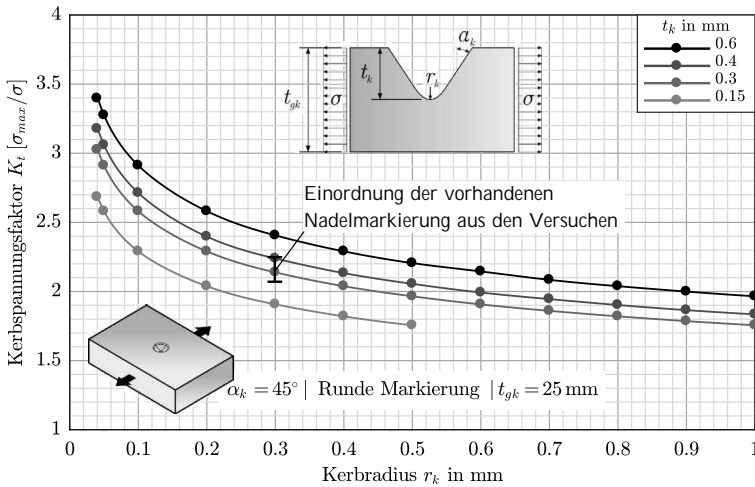


Abb. 5.19 Kerbspannungsfaktoren für typische Nadelmarkierungen mit punktförmiger Kerbgeometrie in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbradien r_k und Kerbtiefen t_k mit Einordnung der vorhandenen Geometrien aus den experimentellen Untersuchungen

5.5.6 Einfluss der Kerbtiefe und des Kerbradius

Die bisherigen Untersuchungen haben ergeben, dass im Rahmen der betrachteten Größenordnungen der Öffnungswinkel der Kerbe sowie die Blechdicke des Grundmaterials eine untergeordnete Rolle für die Kerbformzahl spielen. Bei der Kerbtiefe und dem Kerbradius ist von einem deutlich größeren Einfluss auszugehen. Im Rahmen der Berechnungen zur Bestimmung von Kerbspannungsfaktoren für Oberflächenkerben aus dauerhaften Kennzeichnungen wurden Kerbtiefen von $t_k = 0,1 - 3$ mm sowie Kerbradien zwischen $r_k = 0,04$ mm und $r_k = 1$ mm untersucht. Die ermittelten Kerbspannungsfaktoren sind in Abb. 5.20 für verschiedene Kerbradien über die Kerbtiefe aufgetragen, in Abb. 5.21 für verschiedene Kerbtiefen über den Kerbradius. In Abb. 5.20 sind zusätzlich noch die Größenordnungen der Kerbfaktoren für die Kennzeichnungen der experimentellen Untersuchungen dargestellt. Hierbei wurden für die Fräsmarkierungen die lokalen kleinen Radien zur Bestimmung der Kerbfaktoren angesetzt, vgl. Abschnitt 5.3 und Anhang A. Die Kerbfaktoren sind daher vergleichsweise konservativ abgeschätzt. Streuungen der Markiertiefe wurden nicht zusätzlich berücksichtigt. Die Kerbfaktoren spiegeln die geometrischen Einflüsse wider. Faktoren wie eine Randschichtaufhärtung

des Gefüges infolge der Plasmamarkierung oder eingebrachte Druckeigenspannungen infolge der Stempel- und Nadelmarkierung können hier nicht berücksichtigt werden. Dennoch lässt sich gut veranschaulichen, dass eine Stempelmarkierung geometrisch die höchste Kerbschärfe aufweist. Die gefrästen Markierungen lassen sich ebenfalls vergleichsweise hohen Kerbspannungsfaktoren zuordnen, da für die Bestimmung die Radien der Mikrokerben angesetzt wurden. Wie bereits beschrieben, ist diese Annahme als durchaus konservativ zu bewerten. Die Plasmamarkierungen zeigen aufgrund der großen Radien und weichen Übergänge die geringsten Kerbfaktoren der drei berücksichtigten Methoden.

Im Allgemeinen wird deutlich, dass die Kerbspannungsfaktoren mit einem abnehmenden Kerbradius exponentiell ansteigen, siehe Abb. 5.21. Ausgehend von der Annahme, dass Kerbfaktoren $K_t > 5$ als versagensrelevant und Faktoren $K_t < 2,5$ als unkritisch betrachtet werden, siehe auch [51], können die Harten Stempelungen sowie die tieferen Fräsmarkierungen sicher als versagensrelevant eingestuft werden, wohingegen sich die Plasmamarkierungen in einem Grenzbereich von $K_t \approx 2,7 - 3,8$ bewegen. Die weniger tiefen Fräsmarkierungen der Stahlsorte S355 lassen sich immer noch Kerbfaktoren $4,6 < K_t < 7,2$ zuordnen. Diese sind zwar kleiner als die Kerbformzahlen für die tieferen gefrästen Markierungen, allerdings nicht als unkritisch einzustufen.

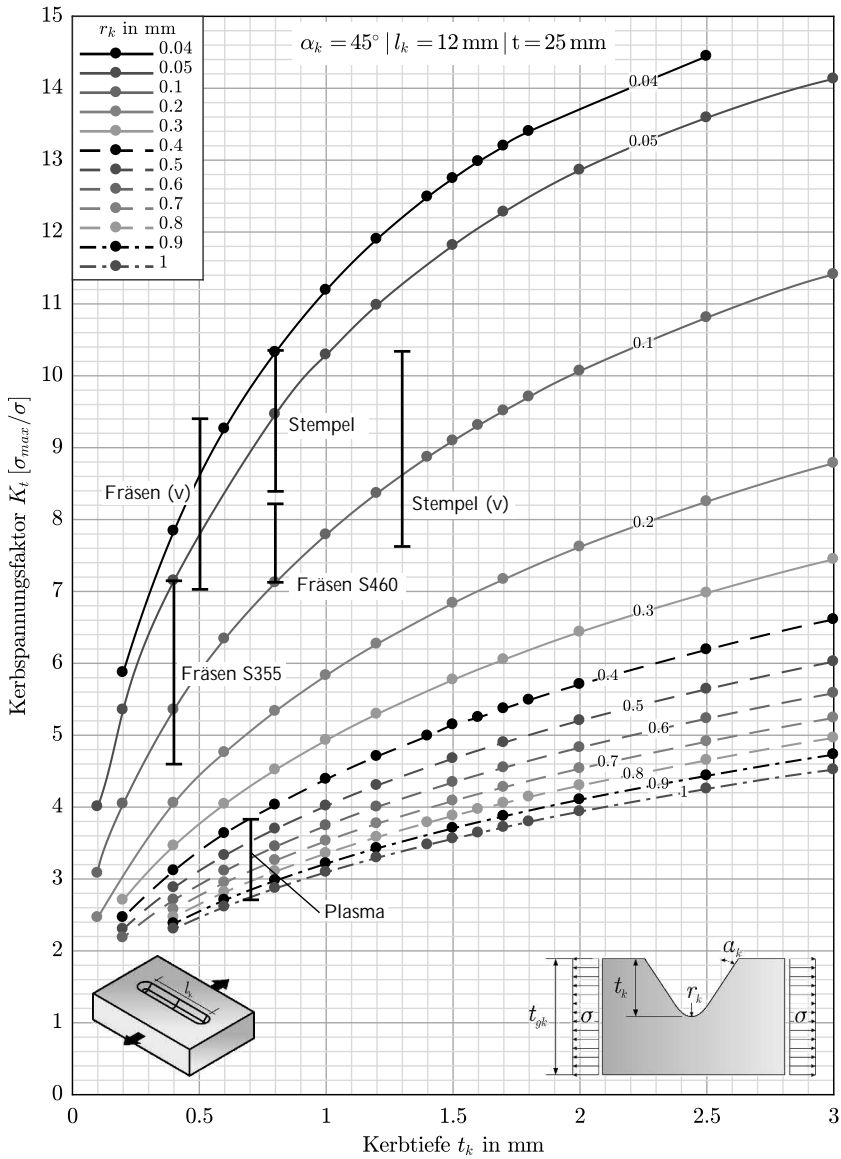


Abb. 5.20 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Kerbradien r_k mit Einordnung der vorhandenen Geometrien aus den experimentellen Untersuchungen

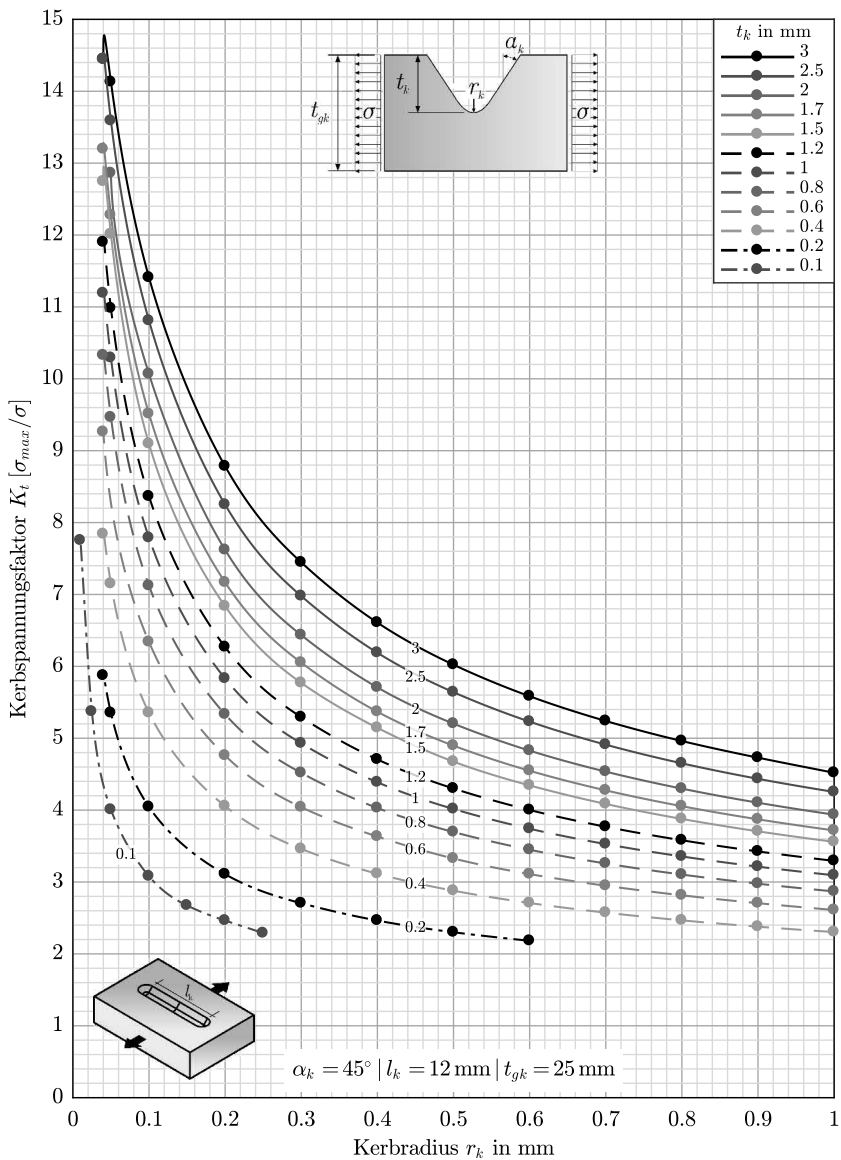


Abb. 5.21 Kerbspannungsfaktoren in Abhängigkeit des Kerbradius r_k für unterschiedliche Kerbtiefen t_k

5.6 Berücksichtigung von nichtlinearem Materialverhalten

5.6.1 Allgemeines

Die bisher in Abschnitt 5.5 ermittelten Kerbspannungsfaktoren können je nach Höhe der Belastung rechnerisch zu sehr hohen Spannungsspitzen im Bereich des Kerbgrundes führen. Aufgrund der Materialeigenschaften des Baustahls bilden sich diese hohen Spannungen jedoch nicht in voller Höhe aus, da es lokal zum Fließen des Werkstoffs kommt und die anliegenden Spannungen umgelagert werden. Weiterhin können bei derart hohen lokalen Beanspruchungen Mikrorisse eingeleitet werden, die eine Spannungsreduzierung bewirken, ohne dass bei fortgesetzter Ermüdungsbelastung diese Risse weiter wachsen.

Um diese Mikrostützwirkung zu berücksichtigen, wurden zusätzlich zu den Berechnungen der Kerbspannungsfaktoren für ausgewählte Kerbgeometrien und Stahlsorten vergleichende Berechnungen unter Berücksichtigung wahrer Spannungen und wahrer plastischer Dehnungen durchgeführt.

5.6.2 Materialgesetz

Für die Berechnung der tatsächlichen Spannungen unter Berücksichtigung des ab der Fließgrenze nichtlinearen Materialverhaltens wurden aus den Daten der durchgeführten Zugversuche aus Abschnitt 3.2.2 Materialparameter zur Ermittlung eines Materialgesetzes bestimmt. Hierzu wurden zunächst wahre Spannungen sowie wahre Dehnungen nach Gleichung 5.2 und 5.3 aus den ermittelten Zugversuchsdaten bestimmt, siehe auch [52].

$$\varepsilon_{wahr} = \ln(1 + \varepsilon_{tech}) \quad (5.2)$$

$$\sigma_{wahr} = \sigma_{tech}(1 + \varepsilon_{wahr}) \quad (5.3)$$

Hierbei sind σ_{tech} und ε_{tech} die aus den Zugversuchen ermittelten Spannungen und Dehnungen bezogen auf den Anfangsquerschnitt der Zugprobe. Die für das Materialgesetz benötigten plastischen Dehnungen lassen sich aus den wahren Spannungen und wahren Dehnungen dann wie folgt berechnen:

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{wahr} - \sigma_{wahr} \cdot E^{-1} \quad (5.4)$$

Die so ermittelten Paarungen von wahrer Spannung und wahrer plastischer Dehnung wurden bis zu einer Dehnung von $\varepsilon_{pl} = 100 \text{ mm} \cdot \text{mm}^{-1}$ extrapoliert

und dann in Kombination mit dem E-Modul in ANSYS zur Festlegung des Materialgesetzes verwendet.

Zwei exemplarische wahre Spannung-wahre plastische Dehnung-Kurven sind für die im Rahmen der experimentellen Untersuchungen verwendeten Baustähle S355J2+N sowie S460N mit einer Nenndicke von $t = 25$ mm in Abb. 5.22 dargestellt.

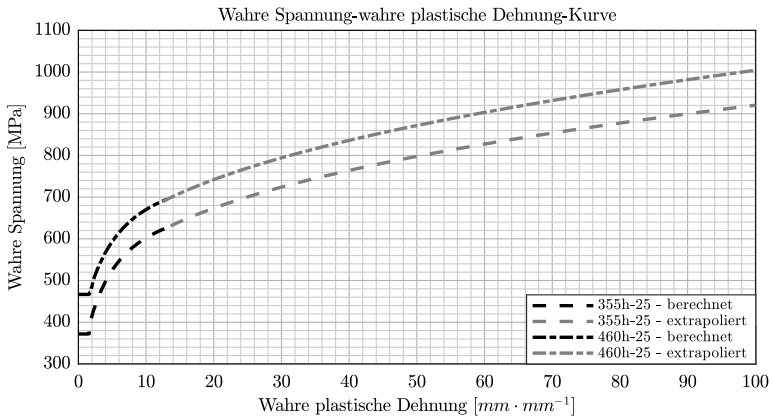


Abb. 5.22 Exemplarische Darstellung der wahre Spannung-wahre plastische Dehnung-Kurven für zwei betrachtete Baustähle S355J2+N und S460N mit einer Nenndicke von $t = 25$ mm

5.6.3 Stützwirkung

Belastungen oberhalb der Streckgrenze führen in duktilen Materialien wie Baustählen zu ausgeprägten plastischen Verformungen. In Abhängigkeit des Kerbspannungsfaktors wird die Streckgrenze des Materials im unmittelbaren Bereich um eine Oberflächenkerbe deutlich früher erreicht als im ungeschwächten Bruttoquerschnitt. Bei einer linear-elastischen Betrachtung bildet sich eine typischen nierenförmige Spannungsverteilung um den Kerbgrund, siehe Abb. 5.23 (links). Die Spannungsspitzen sind im Regelfall lokal stark begrenzt, weshalb bei Berücksichtigung plastischer Verformungsanteile eine Umlagerung der Spannungen durch örtliches Fließen des Materials stattfindet, wodurch hohe Spannungsspitzen reduziert werden, Abb. 5.23 (rechts). Die maximale Hauptspannung befindet sich dann nicht mehr unmittelbar an der Oberfläche der Kerbe, da hier die Spannungen umgelagert wurden, sondern unterhalb der Kerboberfläche.

Dieses bekannte Verhalten bestätigt sich ebenfalls in den Spannungsgradienten normal zur Kerboberfläche. In Abb. 5.24 und Abb. 5.25 sind die Spannungsgradienten für verschiedene Kerbtiefen t_k und unterschiedliche Kerbradien r_k für eine rein linear-elastische sowie real-plastische Berechnung gegenübergestellt. Aus den Kurven wird ersichtlich, dass sich die im Rahmen der Bestimmung von Kerbspannungsfaktoren berücksichtigten Spannungsspitzen aufgrund der Stützwirkung nicht voll ausbilden. Insbesondere für kleine Kerbradien r_k (blaue Linien) wird die Spannungserhöhung stark überschätzt.

Weitere Gegenüberstellungen von elastischer und plastischer Spannungskonzentration sind in Abb. 5.26 und Abb. 5.27 für exemplarische Spannungsberechnungen an im Rahmen der *Hauptuntersuchungen* eingesetzten Baustählen S355J2 und S460N der Nenndicke 25 mm gegeben. Berechnet sind die jeweils linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für je drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Kombination mit Kerbradien von $r_k = 0,1 - 1$ mm. Die Überschätzung der Spannungskonzentration durch Kerbfaktoren kann hier ebenfalls festgestellt werden. Bemerkenswert ist dabei, dass die qualitativen Verläufe der Kurven für beide Stahlsorten identisch sind. Bereits bei vergleichsweise großen Kerbradien und kleinen Kerbtiefen ergeben sich bei linear-elastischer Berechnung deutlich größere Spannungen als bei Berechnungen mit tatsächlichem Materialgesetz. Der prozentuale Abstand zwischen linear-elastischer sowie tatsächlicher Spannung steigt mit kleiner werdendem Kerbradius deutlich an. Aufgrund dieser Überschätzung, siehe auch [8, 26, 51], kann zur Abschätzung des Einflusses der Oberflächenkerben infolge der vier dauerhaften Kennzeichnungsmethoden die Kerbwirkungszahl betrachtet werden.

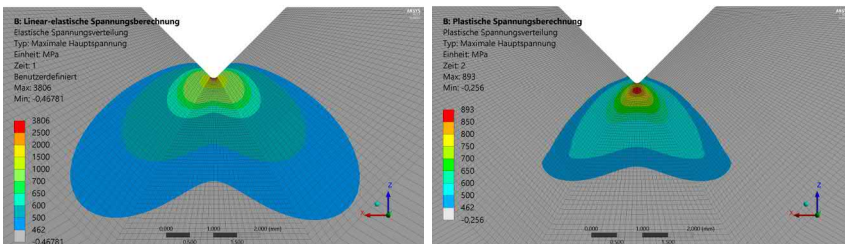


Abb. 5.23 Elastische (links) und plastische (rechts) Spannungsverteilung infolge einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm mit einem Kerbradius von $r_k = 0,1$ mm unter einer Zugnormalspannung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y = 420 \text{ N/mm}^2$

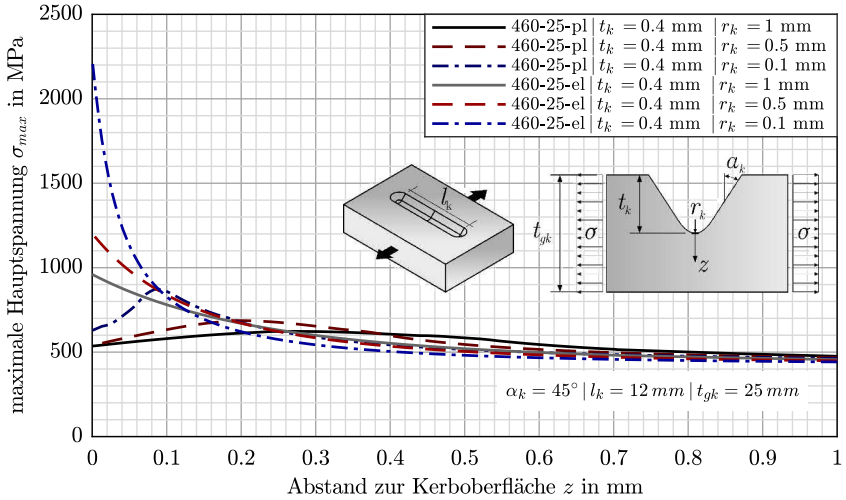


Abb. 5.24 Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 0,4$ mm für verschiedene Kerbradien r_k unter Berücksichtigung linear-elastischer sowie real-plastischer Betrachtungen

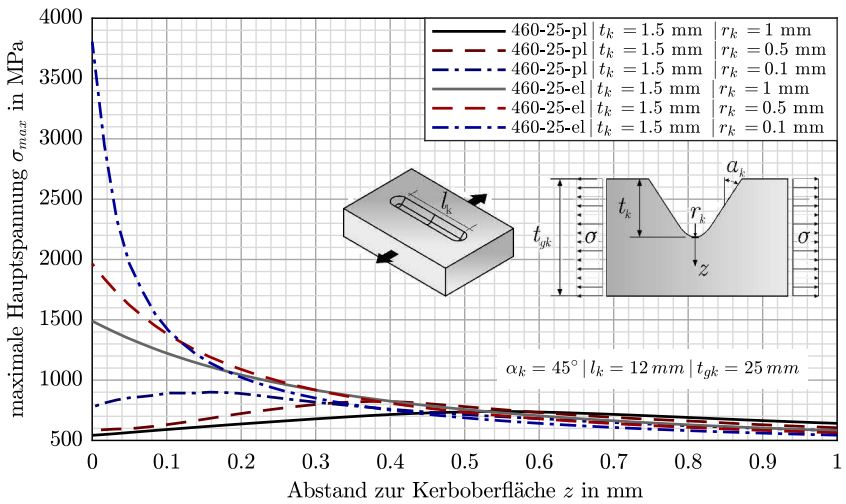


Abb. 5.25 Spannungsgradienten normal zur Oberfläche einer Kerbe der Tiefe $t_k = 1,5$ mm für verschiedene Kerbradien r_k unter Berücksichtigung linear-elastischer sowie real-plastischer Betrachtungen

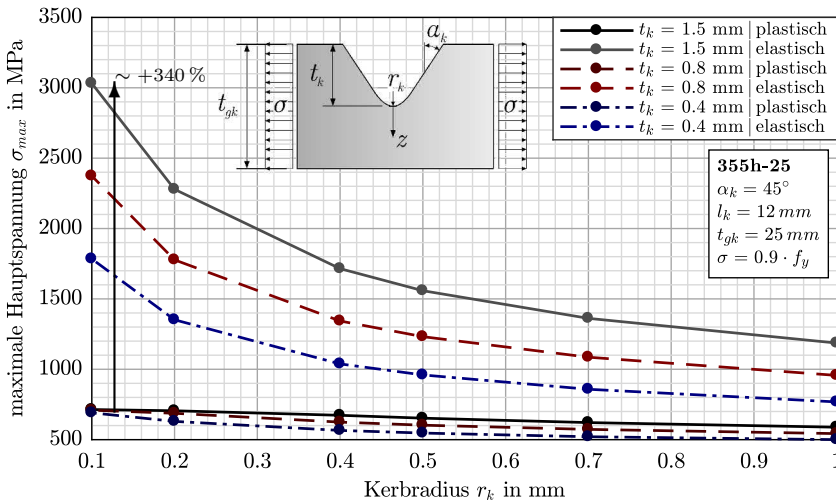


Abb. 5.26 Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0.9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S355J2

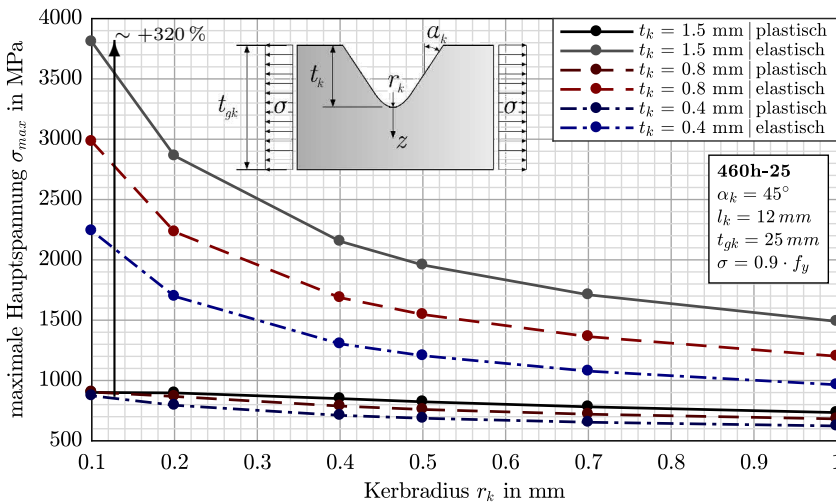


Abb. 5.27 Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0.9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S460N

5.7 Kerbwirkungszahlen

Die in Abschnitt 5.5 bestimmten Kerbspannungsfaktoren liefern einen Einblick in den Einfluss verschiedener Kerbgeometrien auf die Spannungsverteilung im unmittelbaren Bereich um den Kerbgrund, wenngleich die rein linear-elastische Betrachtung den Einfluss auf die tatsächliche Spannungskonzentration und damit auch auf die Ermüdungsfestigkeit überschätzt, insbesondere für große Kerbtiefen und – noch deutlicher – für kleine Kerbradien. Aus diesem Grund werden im folgenden Kerbwirkungszahlen bestimmt, welche in Abhängigkeit des Spannungsgradienten ausgedrückt werden können. Hierdurch kann dem Umstand Rechnung getragen werden, dass sich die Spannungsspitzen tatsächlich aufgrund der Duktilität von Baustählen und der daraus folgenden Stützwirkung nicht voll ausprägen. Die Kerbwirkungszahl β_k ist definiert als die Dauerfestigkeit eines ungekerbten Prüfstabes im Verhältnis zur Dauerfestigkeit eines gekerbten Prüfstabes:

$$\beta_k = \sigma_{D, \text{poliert}} / \sigma_{D, \text{gekerbt}} \quad (5.5)$$

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Vorschlägen, um von ermittelten Kerbspannungsfaktoren auf die Kerbwirkungszahl β_k zu schließen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Ein häufig verwendeter Ansatz führt über den Spannungsgradienten normal zur Kerboberfläche mithilfe einer Abschätzung der Stützziffer $n(\chi)$ nach [53] zu:

$$n(\chi) = K_t / \beta_k \quad \Leftrightarrow \quad \beta_k = K_t / n(\chi) \quad (5.6)$$

Hierbei ist χ das Spannungsgefälle senkrecht zur Kerboberfläche, siehe auch Abb. 5.28, mit:

$$\chi = \frac{1}{\sigma_{\text{peak}}} \cdot \frac{d\sigma}{dx} \bigg|_{x=0} \quad (5.7)$$

Für runde Kerben kann das Spannungsgefälle mit $\chi \approx r/2$ abgeschätzt werden. Für die hier untersuchten Kerben mit runden, halbelliptischen und v-förmigen Geometrien ist dies nicht ohne Weiteres möglich, weshalb für die hier vorgestellten Ergebnisse das Spannungsgefälle individuell für jede Kerbgeometrie bestimmt wurde.

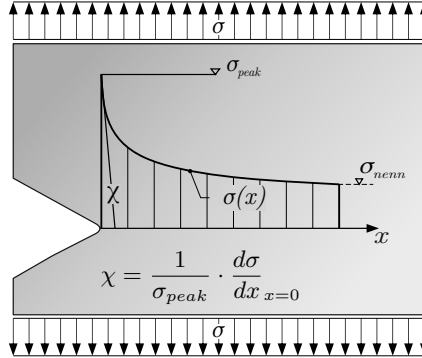


Abb. 5.28 Definition des Kerbspannungsfaktors sowie des bezogenen Spannungsgefälles zur Bestimmung der Kerbwirkungszahl nach [8, 51]

Mithilfe des berechneten Spannungsgefälles χ lassen sich dann die Stützziffern $n(\chi)$ ermitteln. Nach [53] und [54] können die Stützziffern unter anderem wie folgt berechnet werden:

$$\text{Für } \chi < 0,1 \text{ mm}^{-1} : \quad n(\chi) = 1 + \chi \cdot 10^{-(a_\chi - 0,5 + R_m/b_\chi)}, \quad (5.8)$$

$$\text{für } 0,1 \text{ mm}^{-1} < \chi \leq 1 \text{ mm}^{-1} : \quad n(\chi) = 1 + \chi^{1/2} \cdot 10^{-(a_\chi + R_m/b_\chi)}, \quad (5.9)$$

$$\text{für } \chi > 1 \text{ mm}^{-1} : \quad n(\chi) = 1 + \chi^{1/4} \cdot 10^{-(a_\chi + R_m/b_\chi)}. \quad (5.10)$$

Entsprechend [54] sind für Baustähle $a_\chi = 0,5$ und $b_\chi = 2700$ anzusetzen.

Für die beiden betrachteten Stahlsorten S355J2+N und S460N mit je einer Erzeugnisdicke von 25 mm ergeben sich trotz unterschiedlicher technischer Zugfestigkeiten R_m quasi identische Kerbwirkungszahlen, weshalb im Folgenden keine Unterteilung nach Stahlsorte vorgenommen wird. Die für die Berechnung der Kerbwirkungszahlen erforderlichen Kenngrößen sind in Tabelle 5.2 exemplarisch für zwei Kerbradien $r_k = 1 \text{ mm}$ und $r_k = 0,1 \text{ mm}$ dargestellt. Alle weiteren Kenngrößen sind Anhang C zu entnehmen.

Tab. 5.2 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k und Kerbradien r_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
1	3,0	4,52	1,08	1,20	3,8
1	2,5	4,25	1,16	1,20	3,5
1	2,0	3,94	1,26	1,21	3,3
1	1,5	3,56	1,48	1,23	2,9
1	1,2	3,29	1,61	1,24	2,7
1	1,0	3,09	1,67	1,24	2,5
1	0,8	2,87	1,79	1,25	2,3
1	0,6	2,61	1,93	1,26	2,1
1	0,4	2,30	2,11	1,27	1,8
0,1	3,0	11,41	2,78	1,31	8,7
0,1	2,5	10,81	2,63	1,30	8,3
0,1	2,0	10,07	3,16	1,33	7,5
0,1	1,5	9,09	5,23	1,43	6,4
0,1	1,2	8,36	5,95	1,46	5,7
0,1	1,0	7,79	6,67	1,49	5,2
0,1	0,8	7,12	7,36	1,51	4,7
0,1	0,6	6,34	8,32	1,54	4,1
0,1	0,4	5,35	9,90	1,59	3,4
0,1	0,2	4,04	12,48	1,66	2,4
0,1	0,1	3,08	16,67	1,77	1,7

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12 \text{ mm}$

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Darüber hinaus sind die ermittelten Kerbwirkungszahlen in Abb. 5.29 zusammengefasst.

Für die Kerbgeometrien der *Haupt- und Voruntersuchungen*, ausgenommen Nadelmarkierungen, sind die Bereiche der entsprechenden Kerbwirkungszahlen kenntlich gemacht. Aufgrund der ohnehin schon sehr kleinen Kerbspannungsfaktoren für Nadelmarkierungen, siehe Abb. 5.19, wurde hier auf eine zusätzliche Bestimmung der Kerbwirkungszahlen verzichtet. Streuungen der Markiertiefe wurden nicht zusätzlich berücksichtigt. Die qualitativen Verläufe der Kerbwirkungszahlen über die Kerbtiefe wirken zunächst identisch zu den vorgestellten Verläufen der Kerbspannungsfaktoren in Abb. 5.20. Bemerkenswert ist jedoch,

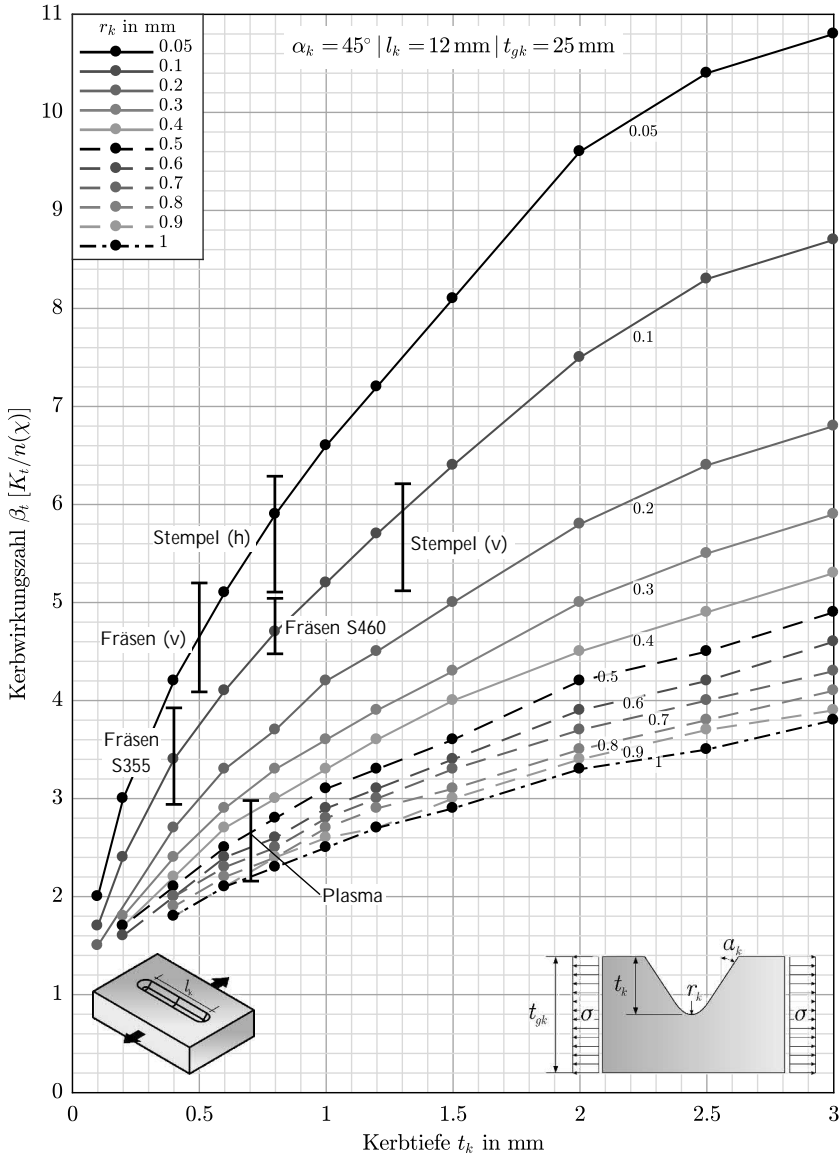


Abb. 5.29 Kerbwirkungszahlen in Abhängigkeit der Kerbtiefe t_k für unterschiedliche Kerbradien r_k für S355J2 und S460N

dass insbesondere bei kleinen Kerbradien und kleinen Kerbtiefen die Kerbwirkungszahlen aufgrund der berücksichtigten Stützwirkung deutlich hinter den Kerbformzahlen zurückbleiben. Die Kerbspannungsfaktoren können mithilfe der Kerbwirkungszahlen außerdem effektiv reduziert werden. Aufgrund der teilweise sehr steilen Spannungsgradienten, siehe auch Tabelle 5.2 sowie Anhang C, reduzieren sich die Kerbspannungsfaktoren um im Mittel 26 %, mindestens jedoch um ca. 16 % für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 3 \text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 1 \text{ mm}$ und maximal um ca. 49 % für eine Kerbe der Tiefe $t_k = 0,1 \text{ mm}$ mit einem Kerbradius von $r_k = 0,05 \text{ mm}$.

Der Vergleich zwischen real-plastischen und linear-elastischen Spannungen für verschiedene Kerbgeometrien in Baustählen S355J2 und S460N hat in Abb. 5.26 und Abb. 5.27 gezeigt, dass durch eine rein elastische Betrachtung die Spannungskonzentration infolge der Oberflächenkerbe überschätzt wird. Berücksichtigt man neben der linear-elastischen Betrachtung eine Anpassung der Spannungskonzentrationen durch Kerbwirkungszahlen, Abb. 5.30 und Abb. 5.31, wird ersichtlich, dass die vorliegenden Spannungen deutlich besser approximiert werden können. Insbesondere für große Kerbradien werden die vorherrschenden Verhältnisse bereits gut abgeschätzt. Auch bei kleinen Radien ergibt sich eine zwar immer noch konservative, aber deutlich genauere Abschätzung der ermüdungswirksamen Spannungen.

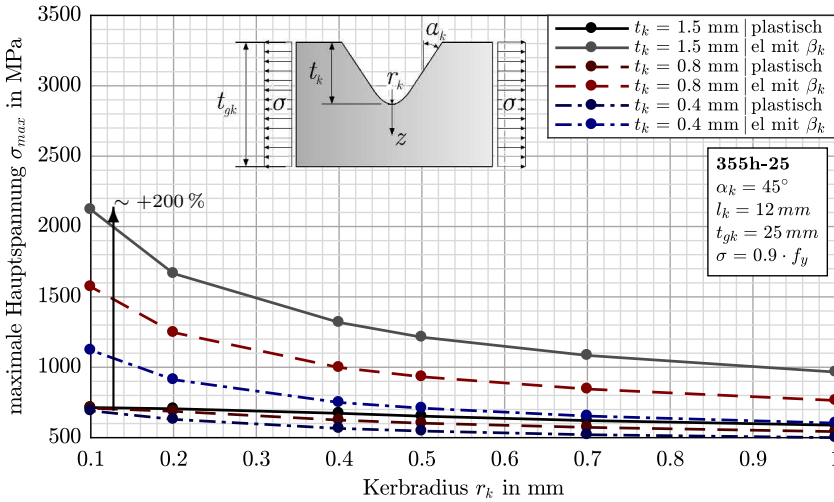


Abb. 5.30 Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S355J2

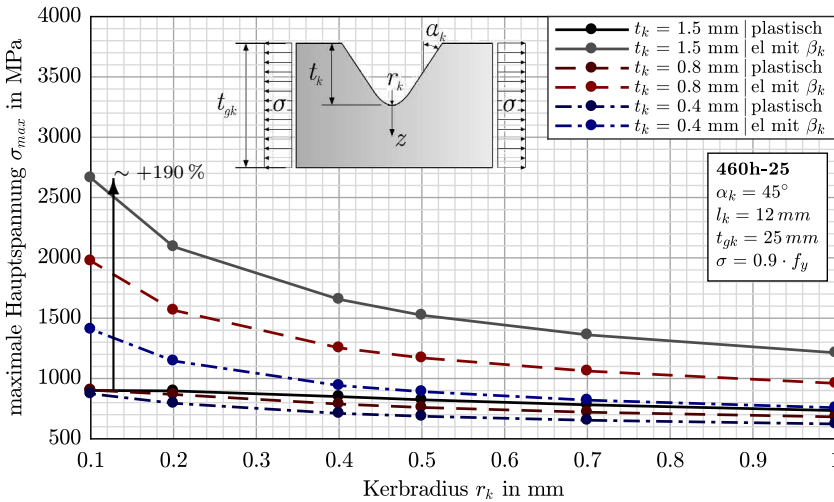


Abb. 5.31 Gegenüberstellung von linear-elastischen sowie plastischen Spannungen bei einer äußeren Zugbelastung von $\sigma = 0,9 \cdot f_y$ für drei Kerbtiefen 0,4 mm, 0,8 mm und 1,5 mm in Abhängigkeit von Kerbradien $r_k = 0,1 - 1$ mm in Baustahl S460N

5.8 Zusammenfassende Erläuterungen

Mithilfe von FE-Be-rech-nung-en wurden Kerbspannungsfaktoren für gängige Kennzeichnungsgeometrien bestimmt. Hierzu wurden zunächst die aus den Untersuchungen in Kapitel 4 gewonnenen 3D-Modelle zur Idealisierung der untersuchten Kennzeichnungskerben herangezogen. Mithilfe der Messdaten der Mikroskopie konnten typische Kennzeichnungsgeometrien und -parameter ermittelt werden. Insbesondere ließen sich drei geometrische Faktoren zur Beschreibung der Oberflächenkerben infolge der vier untersuchten Kennzeichnungsmethoden feststellen. Die für die Beschreibung der Kerben benötigten Kenngrößen Kerbtiefe t_k , Kerbradius r_k und Öffnungswinkel α_k wurden für die vorliegenden Kennzeichnungen qualitativ und quantitativ ermittelt und exemplarisch dokumentiert. Es konnten spezifische Größenordnungen geometrischer Parameter für jede Kennzeichnungsmethode dargelegt werden.

Zur Bestimmung der Spannungskonzentrationsfaktoren wurden zunächst die Parameter bestimmt, welche die Spannungskonzentration infolge der durch die vier behandelten dauerhaften Kennzeichnungsmethoden eingebrachten Oberflächenkerben maßgeblich beeinflussen. Im Rahmen erster Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass die im Vergleich zur Blechdicke der Prüfkörper und Bauteile vergleichsweise kleinen Kerben eine lediglich lokale Störung darstellen. Der Kräftefluss wird unter Annahme der den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen nicht über die komplette Blechdicke, sondern nur in einem begrenzten Bereich um die Oberflächenkerbe gestört. Des Weiteren kann aus den durchgeführten Simulationen geschlossen werden, dass der Öffnungswinkel der Kerben einen sehr begrenzten Einfluss auf die Spannungskonzentration und somit auf den Kerbspannungsfaktor ausübt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde dieser Einfluss als vernachlässigbar eingestuft. Für die Berechnungen wurde ein FE-Modell definiert, welches sich an den Abmessungen der im Rahmen dieser Arbeit behandelten Prüfkörper der experimentellen Untersuchungen orientiert. Für dieses Modell hat sich ein Einfluss der Länge der eingebrachten Kerbe quer zur Belastungsrichtung darstellen lassen. Längere Kerben führen generell zu höheren Spannungsspitzen, wenngleich der Einfluss für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Kennzeichnungen als vernachlässigbar eingestuft wurde.

Einen deutlichen Einfluss üben sowohl die Kerbtiefe t_k als auch der Radius im Kerbgrund r_k auf die Spannungskonzentration aus. Der Zusammenhang zwischen

dem Kerbspannungsfaktor, der Kerbtiefe und dem Kerbradius konnte anhand des FE-Modells bestätigt und quantifiziert werden.

Neben den Kerbspannungsfaktoren, welche bekanntlich die Auswirkung einer Kerbe auf die Ermüdungsfestigkeit überschätzen, wurden Kerbwirkungszahlen für unterschiedliche Kerbgeometrien berechnet. Diese tragen dem Umstand Rechnung, dass sich im Bereich hoher Spannungsspitzen eine Stützwirkung des duktilen Baustahls durch lokales Fließen oder lokale Mikrorissbildung ausbildet, welche die im Rahmen der Berechnung von Kerbspannungsfaktoren angewandte Elastizitätstheorie nicht berücksichtigen kann. Die Diskrepanz zwischen der fiktiven Spannung nach linear-elastischer Berechnung und tatsächlich vorhandener plastischer Spannungsverteilung konnte mithilfe des erstellten FE-Modells belegt und quantifiziert werden. Hierzu wurden Berechnungen unter Berücksichtigung plastischer Dehnungen mit aus Zugversuchen entwickelten Materialgesetzen durchgeführt. Anhand dieser Berechnungen konnte gezeigt und bestätigt werden, dass Kerbspannungsfaktoren die schwingfestigkeitsmindernde Wirkung einer Oberflächenkerbe teilweise stark überschätzen. Besonders für Kerben mit kleinen Kerbradien kann ein großer Fehler bestätigt werden. Zudem konnte durch Berücksichtigung der berechneten Kerbwirkungszahlen eine deutlich bessere Korrelation zwischen linear-elastischer und plastischer Berechnung bestätigt werden. Die Kerbwirkungszahlen werden für die Abschätzung des geometrischen Einflusses einer Oberflächenkerbe auf die Ermüdungsfestigkeit als ausreichend betrachtet. Mithilfe der Kerbwirkungszahlen kann somit eine aufwendige plastische Berechnung vermieden werden, wenngleich die Auswirkungen auf die Ermüdungsfestigkeit besonders für kleine Kerbradien nach wie vor konservativ abgeschätzt werden.

Die berechneten Kerbspannungsfaktoren und Kerbwirkungszahlen konnten zunächst den Oberflächenkerben der experimentellen Untersuchungen zugeordnet werden. Darüber hinaus ist zu klären, inwiefern die bestimmten Kennwerte mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen korrelieren.

6 Einordnung der experimentellen und numerischen Untersuchungen im Hinblick auf eine Weiterentwicklung der EN 1090-2 und der EN 1993-1-9

6.1 Allgemeines

In der derzeitigen Normung werden dauerhafte Kennzeichnungen teilweise gefordert und ebenso häufig eingeschränkt oder gar ausgeschlossen. Mit den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit soll ein Einblick in das Ermüdungsverhalten von Baustählen unter Berücksichtigung einer Schädigung durch vier dauerhafte Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln gewonnen werden. Hierzu wurden in den Kapiteln 3 bis 5 zahlreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Anhand aller vorliegenden Versuchsdaten werden im Folgenden die Kennzeichnungsmethoden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Ermüdungsfestigkeit bewertet und verglichen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse werden Empfehlungen für die Überarbeitung der Normen gegeben sowie ein Vorschlag für die Klassifizierung der untersuchten Kennzeichnungsmethoden in „hart“ und „weich“ präsentiert.

6.2 Diskussion aller vorhandenen Versuchsdaten

6.2.1 Einfluss der Kennzeichnungsmethode

Allgemeines

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen ein insgesamt nachvollziehbares Verhalten der Versuchskörper unter Ermüdungsbeanspruchung. Lediglich die durch Nadelmarkierungen gekennzeichneten Versuchskörper zeigen nahezu keine Beeinflussung des Ermüdungsverhaltens infolge der eingebrachten Kerbe. Die Bewertung der Kennzeichnungsmethoden erfolgt getrennt für die je drei untersuchten Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm sowie gesondert für Nadelmarkierungen.

Blechdicke 15 mm

In Abb. 6.1 und Abb. 6.2 sind die Versuchsergebnisse der Prüfkörper mit einer Blechdicke von 15 mm der Stahlsorte S355J2 und S460N vergleichend ausgewertet.

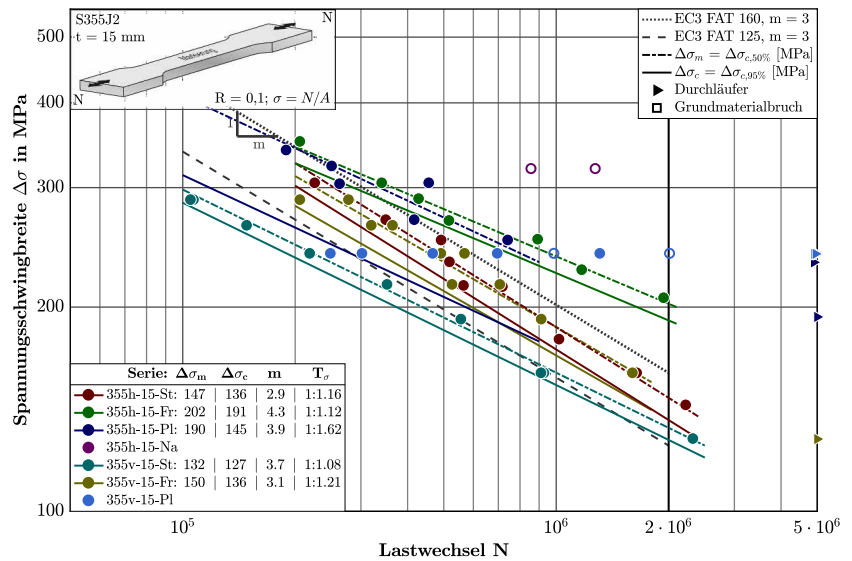


Abb. 6.1 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 15 mm mit freier Wöhlerlinienneigung

Die geringsten Ermüdungsfestigkeiten ergeben sich bei beiden Stahlsorten für gestempelte Versuchskörper mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 127 \text{ N/mm}^2$ (355v-15-St) bzw. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 121 \text{ N/mm}^2$ (460h-15-St).

Bei einer Auswertung der Versuchsserien mit Prüfkörpern aus S355J2 unter variabler Neigung der Wöhlerlinie liegen die Ermüdungsfestigkeiten der gefrästen Prüfkörper mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 136 \text{ N/mm}^2$ (355v-15-Fr) und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 191 \text{ N/mm}^2$ (355h-15-Fr) auf deutlich unterschiedlichen Niveaus. Dies liegt vor allem an der geringen Kennzeichnungstiefe der vorliegenden Fräsmarkierung und bestätigt sich auf Basis der numerischen Untersuchungen ebenfalls anhand der Kerbwirkungszahlen β_k , siehe Abb. 6.3 und Tabelle 6.1. In Abb. 6.3 sind die erzielten Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{c,50\%}$ der einzelnen Versuchsserien den ermittelten

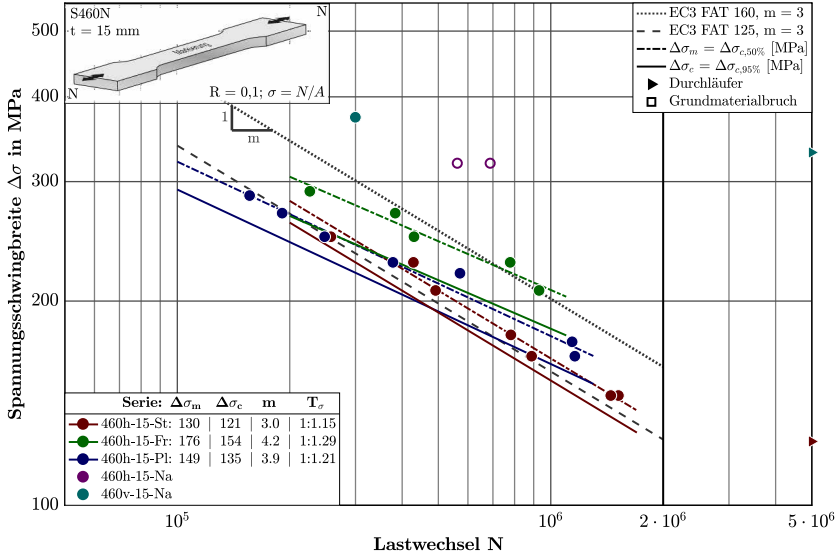


Abb. 6.2 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 15 mm mit freier Wöhlerlinienneigung

Kerbwirkungszahlen β_k unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$ gegenübergestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass mit abnehmender Kerbwirkungszahl die erzielten Ermüdungsfestigkeiten tendenziell steigen. Dies gilt jedoch nicht für die Versuchsserie mit plasmamarkierten Versuchskörpern (355h-15-Pl und 460h-15-Pl). Diese Versuchsserien weisen eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 145 \text{ N/mm}^2$ (S355) bzw. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 135 \text{ N/mm}^2$ auf. Diese Ergebnisse stimmen nicht mit den Verhältnissen der bestimmten Kerbwirkungszahlen überein. Auf Basis der vergleichsweise kleinen Kerbwirkungszahl wären im Vergleich deutlich höhere Ermüdungsfestigkeiten abzuschätzen. Der Grund hierfür liegt nach Ansicht des Verfassers an der Aufhärtung der Randschichten des Materials im Bereich der Markierung. Dadurch lässt sich die Auswirkung der Plasmamarkierung nicht allein durch den geometrischen Einfluss beschreiben. Die Ergebnisse der plasmamarkierten Versuchskörper lassen sich aber in Bezug auf die Untersuchungen in [16] gut verifizieren. In [16] wurde eine Ermüdungsfestigkeit für die mit 10 Ampere markierten Versuchskörper mit einer Blechdicke von 5 mm von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 144 \text{ N/mm}^2$ ermittelt, die eigenen Auswertungen ergaben Ermüdungs-

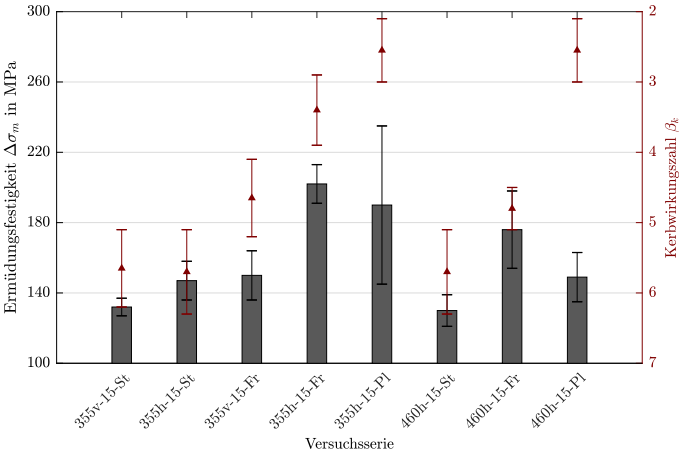


Abb. 6.3 Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 15\text{ mm}$ unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$

Tab. 6.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 15\text{ mm}$

Methode	t_k μm	r_k μm	K_t	β_k	$\Delta\sigma_{c,95\%}$ 15 mm
Hauptuntersuchungen					
355h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	136
460h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	121
355h-Fr	350	50-150	4,6-7,2	2,9-3,9	191
460h-Fr	800	80-100 ^a	7,1-8,2	4,5-5,1	154
355h-Pl	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	145
460h-Pl	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	135
Nadeln	350	350	2,1-2,3	-	-
Voruntersuchungen					
355v-15-St	1300	70-150	7,6-10,4	5,1-6,2	127
355v-15-Fr	500	30-80 ^b	7,0-9,4	4,1-5,2	136
Plasma	1300	400	-	-	-
Nadeln	300	300	2,1-2,25	-	-

^a Global ermittelte Radien unter Vernachlässigung von Mikrokerben:
ca. 700 μm

^b Global ermittelte Radien unter Vernachlässigung von Mikrokerben:
ca. 1500 μm

festigkeiten von mindestens $\Delta\sigma_{c,95\%} = 149 \text{ N/mm}^2$, siehe Abschnitt 2.5.2. Die Markiertiefe lag für diese Versuchskörper in den Umkehr- und Startpunkten bei ca. $310 \mu\text{m}$. Im Gegensatz dazu weisen die hier untersuchten Versuchskörper eine höhere Blechdicke von 15 mm, dafür aber auch eine größere Markiertiefe von ca. $600 \mu\text{m}$ in den Ansatz- und Umkehrpunkten auf.

Blechdicke 25 mm

Die Auswertungen der Ergebnisse für die Versuchskörper der Blechdicke 25 mm sind in Form von Wöhlerdiagrammen in Abb. 6.4 (S355J2) und Abb. 6.5 (S460N) dargestellt.

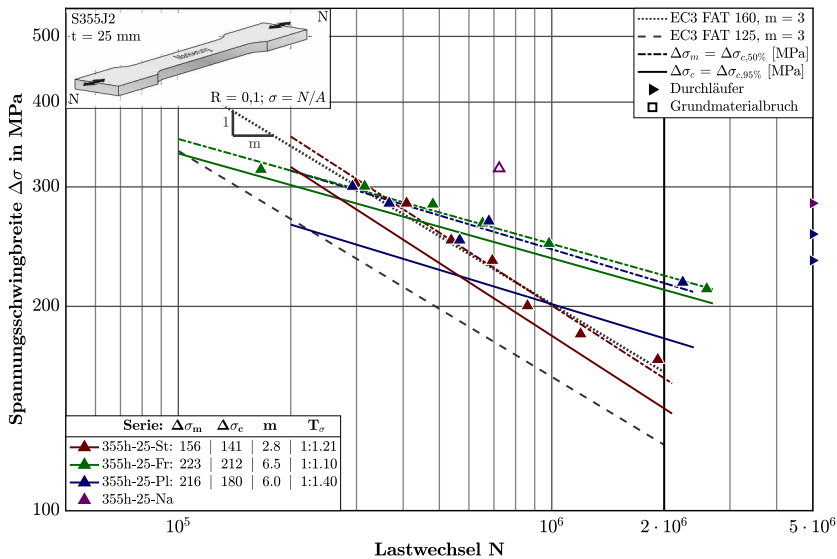


Abb. 6.4 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 25 mm mit freier Wöhlerlinienneigung

Für Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 ergibt sich die geringste Ermüdungsfestigkeit für gestempelte Versuchskörper zu $\Delta\sigma_{c,95\%} = 141 \text{ N/mm}^2$ (355h-25-St). Aus der geringen Tiefe der Fräsmarkierung resultiert eine deutlich größere Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 212 \text{ N/mm}^2$ (355h-25-Fr). Die Ermüdungsfestigkeit der plasmamarkierten Versuchskörper liegt zwischen den beiden Prüfserien mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (355h-25-Pl).

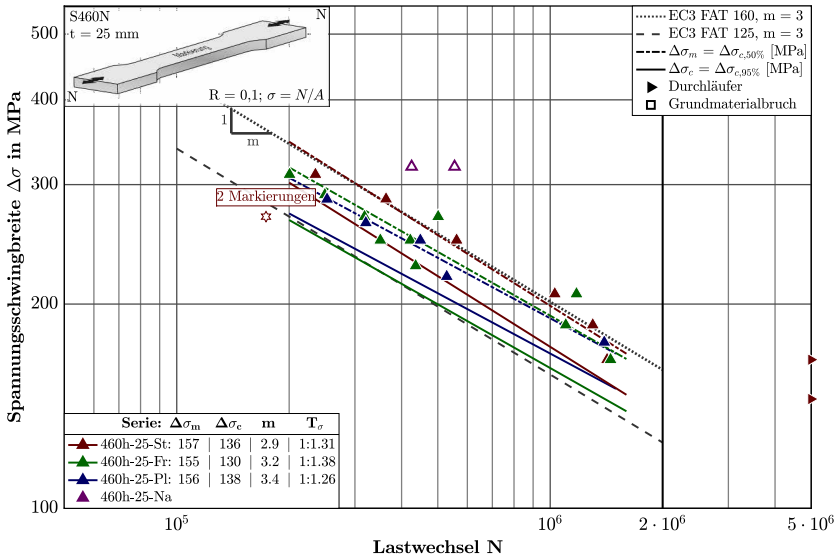


Abb. 6.5 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 25 mm mit freier Wöhlerlinienneigung

Im Gegensatz dazu liegen die Ergebnisse der Versuchsserien der Stahlsorte S460N in einem deutlich schmaleren Streuband, siehe Abb. 6.5. Die Ermüdungsfestigkeit der gestempelten Versuchskörper $\Delta\sigma_{c,95\%} = 130 \text{ N/mm}^2$ (460h-25-St) ist vergleichbar mit der Ermüdungsfestigkeit der entsprechenden Prüfserie aus S355J2 (355h-25-St).

Für die gefrästen Versuchskörper ergibt sich eine im Vergleich zur entsprechenden Versuchsserie aus S355J2 (355h-25-Fr) deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 130 \text{ N/mm}^2$. Dies entspricht einer Abnahme der Ermüdungsfestigkeit von 39 % und ist wie bei der Prüfserie aus gefrästen Versuchskörpern der Blechdicke 15 mm (355h-15-Fr und 460h-15-Fr) auf die unterschiedliche Markiertiefe zurückzuführen.

Die plasmamarkierten Versuchskörper der Stahlsorte S460N zeigen mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 135 \text{ N/mm}^2$ (460h-25-Pl) eine deutlich geringere Ermüdungsfestigkeit als die entsprechende Serie aus S355J2 mit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 180 \text{ N/mm}^2$ (355h-25-Pl).

Die vergleichende Darstellung der Korrelation zwischen den ermittelten Kerbwirkungszahlen und den erzielten Ermüdungsfestigkeiten $\Delta\sigma_{c,95\%}$ ergibt ein ähnlich

zuverlässiges Bild wie bei den Versuchsserien mit Versuchskörpern der Blechdicke 15 mm, siehe Abb. 6.6 und Tabelle 6.2. Tendenziell steigt mit abnehmender Kerbwirkungszahl die Ermüdungsfestigkeit, allerdings liefern die plasmamarkierten Versuchskörper insbesondere der Stahlsorte S460N in Korrelation zur Kerbwirkungszahl deutlich zu geringe Ermüdungsfestigkeiten.

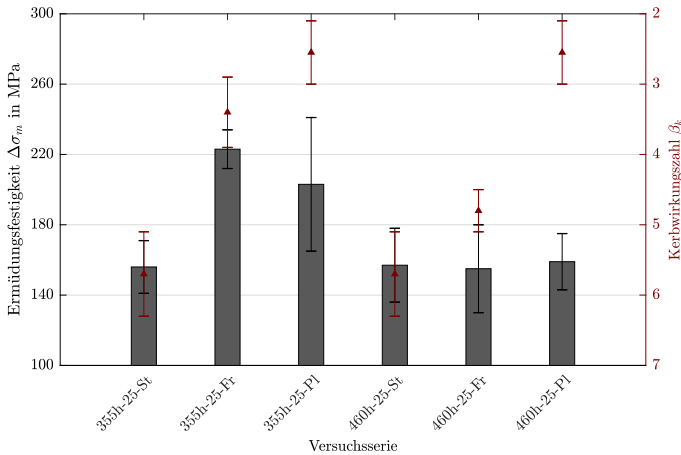


Abb. 6.6 Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 25$ mm unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$

Tab. 6.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 25$ mm

Methode	t_k μm	r_k μm	K_t	β_k	$\frac{\Delta\sigma_{c,95\%}}{25\text{ mm}}$
Hauptuntersuchungen					
355h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	141
460h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	136
355h-Fr	350	50-150	4,6-7,2	2,9-3,9	212
460h-Fr	800	80-100 ^a	7,1-8,2	4,5-5,1	130
355h-P1	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	180
460h-P1	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	143
Nadeln	350	350	2,1-2,3	-	-

^a Global ermittelte Radien unter Vernachlässigung von Mikrokerben: ca. 700 μm

Blechdicke 40 mm

Die Versuchskörper der Blechdicke 40 mm zeigen den geringsten Einfluss aller untersuchten Blechdicken infolge der aufgetragenen Kerben. Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit liegen mit Ausnahme der plasmamarkierten Versuchskörper zwischen 8 % (355h-40-St, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 173 \text{ N/mm}^2$) und 44 % (355h-40-Fr, $\Delta\sigma_{c,95\%} = 232 \text{ N/mm}^2$) über der höchsten Kerbfallklasse 160 nach DIN EN 1993-1-9 [3], siehe Abb. 6.7 und Abb. 6.8.

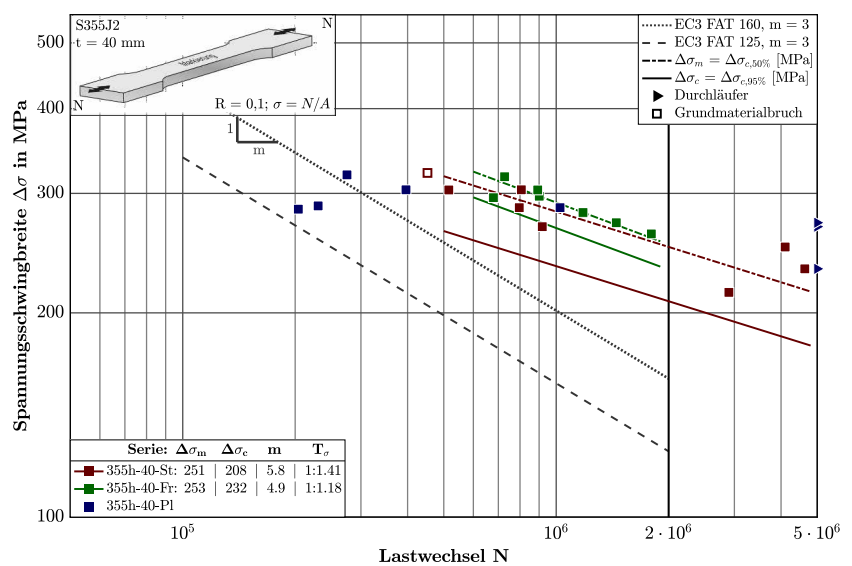


Abb. 6.7 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S355J2 und einer Blechdicke 40 mm mit freier Wöhlerlinienneigung

Wie in Kapitel 3.4.4 erläutert, konnte für die plasmamarkierten Prüfkörper der Stahlsorte S355J2 aufgrund der Streuung der Versuchsergebnisse keine sinnvolle Wöhlerlinie ermittelt werden. Die Prüfkörper zeigten ein nicht nachvollziehbares Verhalten. Drei der getesteten Versuchskörper versagten unter nahezu gleicher Ermüdungsbeanspruchung nach erzielten Lastwechseln zwischen 203.953 und 1.024.000. Dieses große Streuband ist als ungewöhnlich zu betrachten. Es wird vermutet, dass der Einfluss der Plasmamarkierung auf die Versuchskörper der Blechdicke von 40 mm den geringsten Einfluss ausübt. Hieraus ergäbe sich eine sehr flache Wöhlerlinienneigung. Für diese Versuchsserie wird eine Dauerfestigkeit

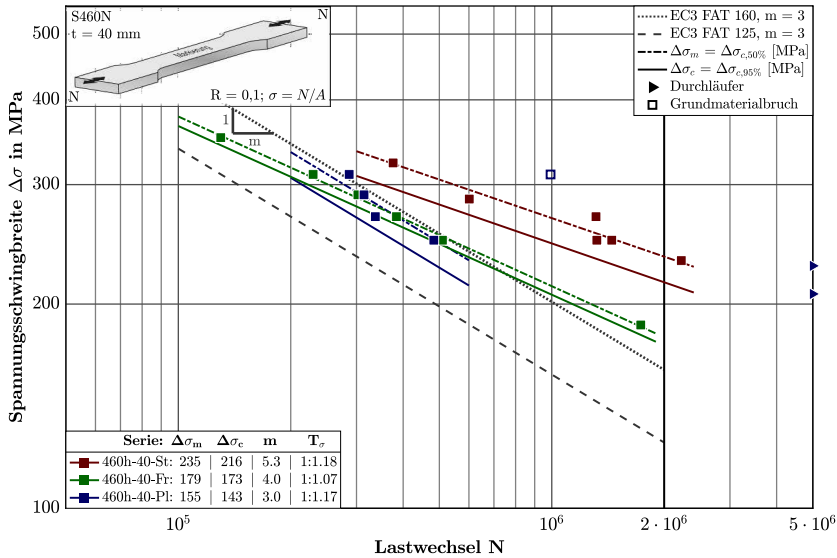


Abb. 6.8 Ergebnisse der Ermüdungsversuche markierter Versuchskörper der Stahlsorte S460N und einer Blechdicke 40 mm mit freier Wöhlerlinienneigung für gestempelte und gefräste Versuchsserien

von ca. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 230 \text{ N/mm}^2$ angenommen. Diese Annahme konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit allerdings nicht gesichert werden.

Die plasmamarkierten Versuchskörper der Stahlsorte S460N erzielten eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 143 \text{ N/mm}^2$. Auch hier wird eine höhere Dauerfestigkeit von ca. $\Delta\sigma_{c,95\%} = 207 \text{ N/mm}^2$ vermutet. Bei allen weiteren Prüfserien mit Materialdicken von 40 mm ergeben sich Ermüdungsfestigkeiten von über 160 N/mm^2 , so dass die Ergebnisse im Bereich von hohen Kerbfallklassen liegen. Trotz größerer Steigungen der Wöhlerlinien schneiden sich diese nicht mit der entsprechenden Wöhlerlinie der Kerbfallklasse 125, siehe Abb. 6.7 und Abb. 6.8.

Nicht nachvollziehbar ist darüber hinaus das Verhalten der gestempelten Versuchskörper. Trotz der scharfen Kerben, welche für die Versuchskörper der Blechdicken von 15 mm und 25 mm zu den im Vergleich geringsten Ermüdungsfestigkeiten führten, ergeben sich für die Versuchskörper der Blechdicke von 40 mm trotz größerer Kerbwirkungszahlen deutlich höhere Ermüdungsfestigkeiten als für die gefrästen Versuchskörper aus S460N der Blechdicke 40 mm, siehe auch Abb. 6.9 und Tabelle 6.3. Der Grund hierfür konnte abschließend nicht geklärt werden.

Da die Ermüdungsfestigkeiten der Versuchskörper der Blechdicke von 40 mm aber grundsätzlich auf einem sehr hohen Niveau sind und durch die Kerbwirkungszahlen unterschätzt werden, wird die Diskrepanz als zunächst unkritisch betrachtet.

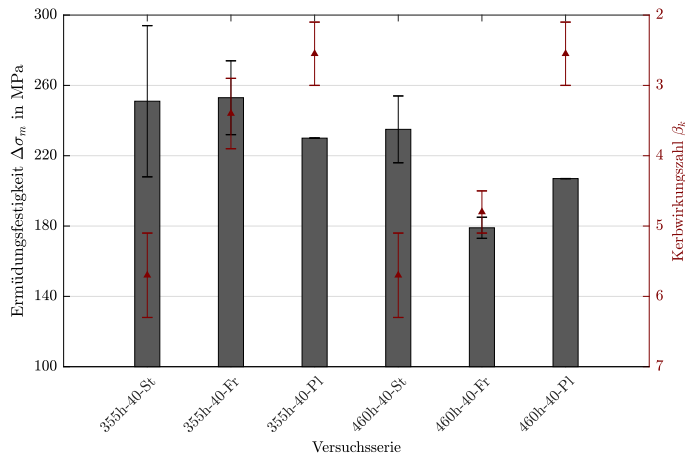


Abb. 6.9 Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für Versuchsserien mit Prüfkörpern der Blechdicke $t = 40$ mm unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$

Tab. 6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen für eine Blechdicke von $t = 40$ mm

Methode	$\frac{t_k}{\mu\text{m}}$	$\frac{r_k}{\mu\text{m}}$	K_t	β_k	$\frac{\Delta\sigma_{c,95\%}}{40\text{ mm}}$
Hauptuntersuchungen					
355h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	208
460h-St	800	40-70	8,4-10,1	5,1-6,3	216
355h-Fr	350	50-150	4,6-7,2	2,9-3,9	232
460h-Fr	800	80-100 ^a	7,1-8,2	4,5-5,1	173
355h-P1	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	207 ^b
460h-P1	700	400-1000	2,7-3,8	2,1-3,0	230 ^b
Nadeln	350	350	2,1-2,3	-	-

^a Global ermittelte Radien unter Vernachlässigung von Mikrokerben: ca. 700 μm

^b Aus den experimentellen Untersuchungen abgeschätzte Dauerfestigkeit

Nadelmarkierung

Der Einfluss der nadelmarkierten Versuchskörper konnte für die durchgeführten Untersuchungen als vernachlässigbar erachtet werden. Die Versuchskörper der *Hauptuntersuchungen* versagten mit Ausnahme eines Durchläufers im Grundmaterial ohne einen Rissausgang von der Markierung. Im Rahmen der *Voruntersuchungen* konnten lediglich für zwei Versuchskörper Ermüdungsbrüche festgestellt werden, die von der Nadelmarkierung ausgingen. Diese versagten zudem bei vergleichsweise hohen Lastwechseln. Aufgrund der verhältnismäßig großen Anzahl an Grundmaterialbrüchen können die Ergebnisse zum einen als konservativ für einen Rissausgang von der Nadelmarkierung, zum anderen als Referenz für das Ermüdungsverhalten von Grundmaterialkerben (z.B. Schnittkanten, Walzoberfläche) betrachtet werden. Die sieben getesteten nadelmarkierten Versuchskörper, welche im Grundmaterial versagten, zeigten Lastwechselzahlen zwischen 425.570 und 1.275.596. Diese großen Streuungen sind unabhängig von den unterschiedlichen Blechdicken und Stahlsorten vor allem auf die höheren Fertigungstoleranzen in der Versuchskörperherstellung zwischen dem eingespannten und verjüngten Bereich zurückzuführen. Der Rissausgang der Grundmaterialbrüche ging in allen Fällen von dieser Ausrundung aus, beginnend von einer der Prüfkörperkanten, vgl. Abb. 6.10.



Abb. 6.10 Exemplarisches Bruchbild (oben) mit Bruchfläche (unten) des Prüfkörpers 355h-15-Na-1

6.2.2 Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl und Ermüdungsfestigkeit

Im Rahmen der Auswertung der Versuche konnte eine insgesamt gute Korrelation zwischen den berechneten Kerbwirkungszahlen und den ermittelten Ermüdungsfestigkeiten hergestellt werden, siehe Abschnitt 6.2.1 und Abb. 6.11.

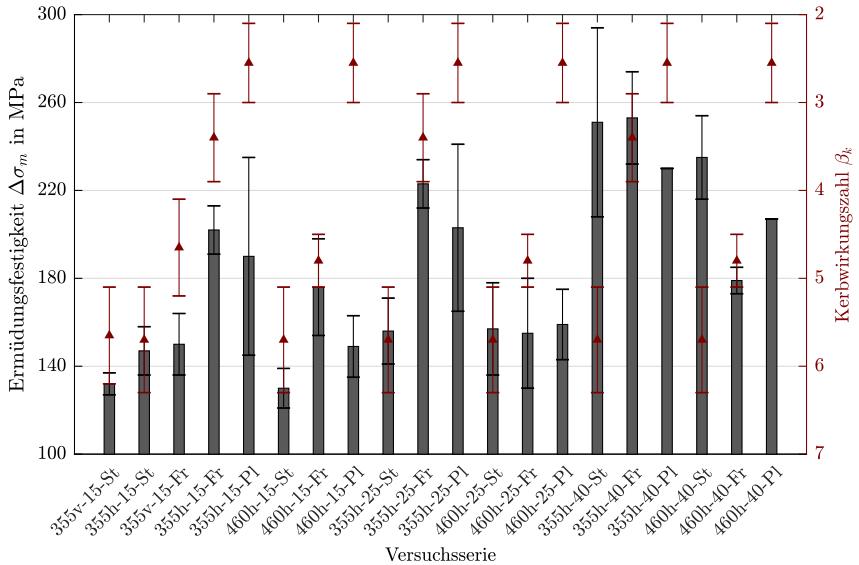


Abb. 6.11 Korrelation zwischen Kerbwirkungszahl β_k und Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,50\%}$ für alle Versuchsserien unter Angabe der Streubänder für $\beta_{k,min}$ und $\beta_{k,max}$ sowie $\Delta\sigma_{c,5\%}$ und $\Delta\sigma_{c,95\%}$

Mit Ausnahme weniger Versuchsserien konnte die Tendenz der ermüdungswirksamen Schädigung gut abgebildet werden. Zum einen wurde für gestempelte Versuchskörper beider Stahlsorten S355J2 und S460N der Blechdicke 40 mm die Ermüdungsfestigkeit unterschätzt, so dass trotz vergleichsweise hoher Kerbwirkungszahlen hohe Ermüdungsfestigkeiten resultierten. Der Grund hierfür konnte abschließend nicht geklärt werden. Da hier die Ermüdungsfestigkeit tendenziell aber unterschätzt wird, ist die Abweichung als unbedenklich zu betrachten.

Zum anderen wurde die Ermüdungsfestigkeit für die plasmamarkierten Versuchskörper durch die Betrachtung der Kerbwirkungszahlen teilweise deutlich überschätzt. Dies liegt vor allem daran, dass bei Plasmamarkierungen die Ermüdungsfestigkeit nicht durch die geometrische Form der eingebrachten Kerbe,

sondern ebenfalls durch eine Aufhärtung der oberflächennahen Schichten herabgesetzt wird.

Für die Einordnung der Kennzeichnungsmethoden zu Kerbwirkungszahlen wurden lediglich die Streuungen der Kerbradien, nicht aber der Markiertiefen innerhalb der mittels der Mikroskopie gemessenen Kerbgeometrien berücksichtigt. Zudem wurden die Geometrien zwar repräsentativ, aber dennoch lediglich stichprobenartig für die jeweiligen Kerben der Kennzeichnungsmethoden bestimmt. Für die Geometrien sind ebenfalls weitere positive sowie negative Streuungen zu erwarten. Zudem unterliegen die Ermüdungsversuche systembedingten Streuungen. Unter diesen Voraussetzungen ist die generelle Korrelation zwischen den berechneten Kerbwirkungszahlen und den ermittelten Ermüdungsfestigkeiten als äußerst positiv zu betrachten.

6.2.3 Einfluss der Blechdicke

Ein Einfluss der Blechdicke auf die Ermüdungsfestigkeit konnte im Rahmen der experimentellen Untersuchungen zwar durchgängig festgestellt werden, allerdings ließ sich ein negativer Blechdickeneffekt, wie beispielsweise bei geschweißten Verbindungen [55–57], im Rahmen der experimentellen Untersuchungen nicht feststellen. Im Gegensatz dazu ist die Tendenz zu beobachten, dass sich die Ermüdungsfestigkeit mit ansteigender Blechdicke für einzelne Versuchsserien vergrößert.

Als möglicher Grund hierfür wird erachtet, dass aufgrund der im Verhältnis zur Blechdicke geringen Kerbtiefe die Störung des Kräfteflusses im Bauteil lokal sehr begrenzt ist, weshalb für die untersuchten Blechdicken kein negativer geometrischer Blechdickeneffekt zu erwarten ist. Diese Annahme hat sich auch in den numerischen Untersuchungen bestätigt. Es konnte für verschiedene Kerbgeometrien gezeigt werden, dass bereits nach wenigen Millimetern unterhalb der Kerboberfläche die Spannung gegen die aufgebrachte Nennspannung tendiert. Die vorliegenden Kerben sind damit als flache Kerben einzustufen, siehe auch [28]. Es sei darauf hingewiesen, dass dies lediglich einen geometrischen Blechdickeneffekt betrifft. Statistische oder technische Größeneinflüsse durch Fehlstellen oder Einschlüsse sind hiervon nicht betroffen. Für die vorgestellten Untersuchungen sind derartige Effekte allerdings nicht aufgetreten.

6.2.4 Einfluss der Streckgrenze

Ein Einfluss der Stahlsorte und somit der Streckgrenze auf das Ermüdungsverhalten konnte im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht durchgängig festgestellt werden. Für die Versuchsserien mit gestempelten Versuchskörpern stellen sich für beide Stahlsorten S355J2 und S460N ähnliche Größenordnungen der Ermüdungsfestigkeiten ein, siehe Abb. 6.12 und Tabelle 6.4. Die Ergebnisse der Versuche mit gefrästen Markierungen sind hinsichtlich des Einflusses der Streckgrenze aufgrund unterschiedlicher Markiertiefen nicht vergleichbar. Die gefrästen Versuchskörper der Stahlsorte S460N weisen erheblich größere Markiertiefen auf, die über die in der Praxis üblichen Markiertiefen weit hinausgehen. Für die plasmamarkierten Versuchskörper der Stahlsorte S460N ergeben sich tendenziell geringere Ermüdungsfestigkeiten als für Prüfkörper der Stahlsorte S355J2. Aufgrund der uneindeutigen Ergebnisse kann der Einfluss der Streckgrenze auf die Ermüdungsfestigkeit weder bestätigt noch ausgeschlossen werden.

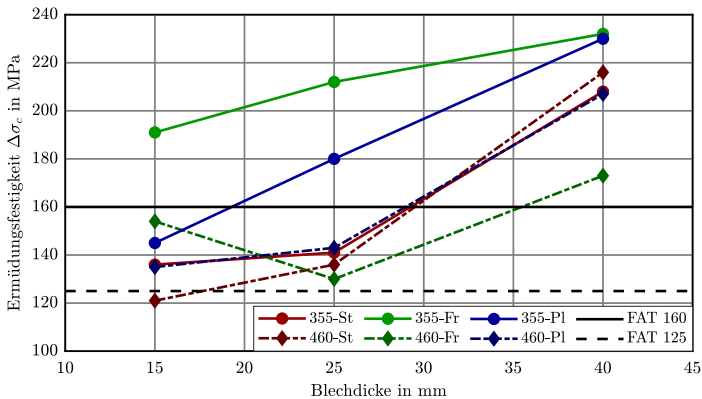


Abb. 6.12 Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%}$ in Abhängigkeit der Blechdicke

Tab. 6.4 Vergleich der erzielten Ermüdungsfestigkeiten in Abhängigkeit der Stahlsorte

Versuchsserie	$\Delta\sigma_{c,95\%}$		$\frac{\Delta\sigma_{c,95\%,S355}}{\Delta\sigma_{c,95\%,S460}}$
	355h*	460h*	
*-15-St	136	121	1,12
*-25-St	141	136	1,04
*-40-St	208	216	0,96
*-15-Fr	191	154	1,24
*-25-Fr	212	130	1,63
*-40-Fr	232	173	1,34
*-15-Pl	145	135	1,07
*-25-Pl	180	143	1,26
*-40-Pl	230 ^a	207 ^a	1,11

^a Aus den Versuchsergebnissen abgeschätzte Dauerfestigkeit

6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse in die Normung

6.3.1 Allgemeines

Basierend auf den durchgeführten zahlreichen Untersuchungen konnte der Einfluss der dauerhaften Markiermethoden auf die Ermüdungsfestigkeit abgeschätzt und quantifiziert werden. Obwohl einige Faktoren, wie veränderte Spannungsverhältnisse $R > 0,1$ und variable Lastkollektive innerhalb der Versuche nicht berücksichtigt wurden, können nach Ansicht des Verfassers Empfehlungen zur Überarbeitung der maßgebenden Normen gegeben werden. Insbesondere sollen Vorschläge zur Aufhebung von Restriktionen der EN 1090-2 bezüglich dauerhafter Kennzeichnungen diskutiert werden. Darüber hinaus werden erste Vorschläge zur Einteilung der Kennzeichnungsmethoden in Kerbfallklassen gegeben, wenngleich hier weitere Untersuchungen als sinnvoll erachtet werden. Hier sind insbesondere Versuche mit veränderten Spannungsverhältnissen oder variablen Lastkollektiven denkbar.

6.3.2 Empfehlung zur Überarbeitung der EN 1090-2

Die sowohl experimentellen als auch numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass dauerhafte Kennzeichnungsmethoden hinsichtlich des Einflusses auf die Ermüdungsfestigkeit durchaus beherrschbar sind. Aus diesem Grund wird es als sinnvoll erachtet einige der herrschenden Restriktionen innerhalb der DIN EN 1090-2 zur Identifizierbarkeit zu lockern:

- (a) Zunächst wird die Formulierung, dass das Aufbringen dauerhafter Kennzeichen erfolgen soll, ohne dass bei der Aufbringung eine Schädigung entsteht, als missverständlich erachtet. Natürlich entstehen bei jeder Aufbringung einer dauerhaften Kennzeichnung unvermeidlich mehr oder weniger starke Schädigungen. Es wird empfohlen, die Formulierung zu ändern, so dass sinngemäß keine Beschädigungen entstehen dürfen, welche über die Markierung als solche hinausgehen.
- (b) Darüber hinaus sollte die für Hartprägungen zulässige Stahlfestigkeitsklasse auf zumindest S460 erhöht werden. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass für einen Baustahl S460N die Ergebnisse zum einen als durchaus positiv einzustufen sind und zum anderen kein durchgängiger Einfluss der Streckgrenze des Materials auf die Ermüdungsfestigkeit ermittelt werden konnte.
- (c) Die Formulierung, dass Kennzeichnungen nur in festgelegten Bereichen zulässig sind, in denen kein Einfluss auf das Ermüdungsverhalten zu erwarten ist, ist zunächst als sinnvoll zu erachten, könnte bei Einführung von Kerbfallklassen für dauerhafte Kennzeichnungen allerdings angepasst werden.
- (d) Von besonderer Bedeutung ist eine Definition der Begriffe Hart- und Weichprägung. Da bisher keine hinreichende Einordnung der Kennzeichnungsmethoden in Hart- oder Weichprägungen vorgenommen werden konnte und somit im engeren Sinn auch unklar ist, welche Kennzeichnungsmethoden unter welchen Voraussetzungen eingesetzt werden dürfen, stellt dies eine dringend zu klärende Frage dar, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Harte und weiche Kennzeichnungsmethoden

Auf Basis der aktuellen Normenlage können die dauerhaften Kennzeichnungsmethoden nicht ohne Weiteres in harte oder weiche Kennzeichnungsmethoden eingeordnet werden. Wie bereits in Abschnitt 2.5.1 verdeutlicht wurde, ist es jedoch sinnvoll, eine Einteilung gemäß des Kräfteflusses vorzunehmen.

Demnach werden in Abschnitt 2.5.1 und [15] fließende Übergänge zwischen der Markierung und dem Grundmaterial als charakteristisch für weiche Kennzeichnungen erachtet, da diese den Kraftfluss weniger stark beeinträchtigen. Dies kann generell bestätigt werden.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen allerdings eine differenziertere Betrachtung zu. Grundsätzlich konnte gezeigt und bestätigt werden, dass tiefe Kerben mit geringen Kerbradien zu größeren Spannungskonzentrationen führen. Die entsprechenden Kerbspannungsfaktoren auf Basis linear-elastischer Berechnungen verdeutlichen genau diesen Effekt. Auf Basis des in Abschnitt 5.5 gewonnenen Kenntnisstands müssten aufgrund der teilweise hohen Kerbspannungsfaktoren die Kennzeichnungsmethoden Stempeln und Fräsen als „hart“ eingestuft werden, die Methoden Plasmamarkieren und Nadeln als „weich“, da hier in der Regel ausgerundete Kerben und fließende Übergänge zum Grundmaterial erreicht werden. Lediglich bei vergleichsweise hohen Stromstärken und filigranen Markierungen erhöhen sich die Kerbspannungsfaktoren in ermüdungsrelevante Bereiche. Eine kombinierte Betrachtung der Kerbspannungsfaktoren, oder besser der Kerbwirkungszahlen, mit den Versuchsergebnissen der Ermüdungsversuche zeigt jedoch, dass insbesondere der Einfluss der Plasmamarkierungen auf die Ermüdungsfestigkeit nicht ausschließlich über die Geometrie der eingebrachten Kerbe bestimmt wird. Obwohl im Rahmen der numerischen Berechnungen vergleichsweise kleine Kerbwirkungszahlen bestimmt wurden, werden in Relation vergleichsweise niedrige Ermüdungsfestigkeiten erzielt.

Der Prozess des Plasmamarkierens härtet die oberflächennahen Schichten der Kennzeichnungsspur auf, wodurch das Material hier weniger duktil ist. Dies führt auch dazu, dass sich die Spannungsspitzen weniger stark durch die Mikrostützwirkung des Stahls abbauen können, woraus eine höhere ermüdungswirksame Beanspruchung resultiert. Obwohl dieser Effekt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht explizit untersucht wurde, wird die Randschichtaufhärtung als Grund dafür erachtet, dass trotz vergleichsweise kleiner berechneter Kerbwirkungszahlen die Ermüdungsfestigkeit stärker beeinträchtigt wird. Es wird daher empfohlen, Plasmamarkierungen ebenfalls als „harte“ Kennzeichnungsmethode einzustufen.

Da sich sowohl im Rahmen der experimentellen als auch der numerischen Untersuchungen quasi kein Einfluss unterschiedlicher Nadelmarkierungen auf die Ermüdungsfestigkeit gezeigt hat, sind nach Ansicht des Verfassers die praxisüblichen Nadelmarkierungen generell als weiche Kennzeichnungen einzustufen. Eine weitere Unterteilung in konventionelle Nadelmarkierungen sowie das sogenannte „low stress needling“, mit speziell verrundeten Nadelspitzen, wird als nicht erforderlich erachtet.

6.3.3 Einordnung der Ergebnisse in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im ungünstigsten Fall bei Berücksichtigung einer gemeinsamen Auswertung aller gestempelten Versuchskörper der Blechdicke 15 mm eine Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_{c,95\%} = 113 \text{ N/mm}^2$ resultiert. Bei getrennter Auswertung aller vorhandenen Versuchsserien ergibt sich die geringste Ermüdungsfestigkeit zu $\Delta\sigma_{c,95\%} = 121 \text{ N/mm}^2$ (460h-15-St). Die Ermüdungsfestigkeiten der Versuchsserien mit Blechdicken von 40 mm liegen unter Berücksichtigung angenommener Dauerfestigkeiten für Plasmamarkierungen ausnahmslos über $\Delta\sigma_{c,95\%} = 170 \text{ N/mm}^2$.

Sich möglicherweise ungünstig auswirkende Faktoren wie erhöhte Mittelspannungen und variable Lastkollektive wurden in der vorliegenden Arbeit nicht gesondert untersucht. Stattdessen wurde ein Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ angesetzt. Ferner wird davon ausgegangen, dass die jeweils konstant angesetzte Spannungsamplitude als schadensäquivalentes Spannungsschwingspiel nach der Palmgren-Miner-Regel variable Lastkollektive abdeckt. Nicht für jede Versuchsserie wurden mindestens zehn Versuchskörper ausgewertet, wenngleich die Ermüdungsversuche in der Regel in aussagekräftigen Wöhlerlinien resultierten. Die Versuche wurden allerdings an im Vergleich zu Bauteilen ungünstigen schmalen Versuchskörpern mit als ungünstig betrachteten Kennzeichnungsparametern durchgeführt. Es kann davon ausgegangen werden, dass für im Verhältnis zur Markierung größere Bauteile höhere Kerbfallklassen resultieren. Auf Basis dieser und den Versuchen darüber hinaus zugrunde gelegten Parametern werden in einem ersten Schritt harmonisierte Kerbfallklassen vorgeschlagen, welche es zu diskutieren gilt, siehe Tabelle 6.5. Diese liegen zwar für einen Teil der tatsächlichen Versuchsergebnisse sehr konservativ, werden für die Praxis aber als besser handhabbar betrachtet. Da für die untersuchten Nadelmarkierungen kein ausgeprägter Einfluss erkennbar war, werden diese im Rahmen der vorgeschlagenen Kerbfallklassen nicht berücksichtigt. Unplanmäßige Ungängen, siehe Abschnitt 2.3, können hier derzeit ebenfalls nicht eingeordnet werden, da bisher keine ausreichende Datenbasis zu geometrischen Ausprägungen vorhanden ist.

Tab. 6.5 Vorschläge zur Einordnung der Versuchsergebnisse in Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9

Kennzeichnungsmethode ^a	Stahlsorte	Blechdicke t	Kerbfallklasse $\Delta\sigma_c$
		mm	N/mm ²
Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren	S355 / S460	$15 \leq t < 40$	100 ^b
	S355 / S460	$t \geq 40$	160 ^{b,c}

^a Für die eingesetzten Kennzeichnungstools ist zu überprüfen, ob die hergestellten Kerben den Randbedingungen in Kapitel 3 und Abschnitt 5.3 genügen. Insbesondere die Markiertiefe t_k sowie der Kerbradius r_k sind einmalig zu überprüfen.

^b Ermittelt mit $R = 0,1$

^c Unter Berücksichtigung von aus Versuchsergebnissen abgeschätzten Dauerfestigkeiten

6.4 Zusammenfassende Erläuterungen

Auf Basis aller Daten aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen wurde der Einfluss der vier betrachteten dauerhaften Kennzeichnungsmethoden auf die Ermüdungsfestigkeit eingeordnet und bewertet. Grundlage der Auswertungen stellten die durchgeführten Ermüdungsversuche an markierten Prüfkörpern der Stahlsorten S355J2 und S460N sowie der drei Blechdicken 15 mm, 25 mm und 40 mm dar. Anhand der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass, abgesehen von der Nadelmarkierung, alle dauerhaften Kennzeichnungen einen Effekt auf die Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Dieser liegt unter Beachtung der, den Versuchen zugrunde gelegten, Randbedingungen in einem Bereich hoher Kerbfallklassen nach DIN EN 1993-1-9. Tendenziell konnte anhand der experimentellen Untersuchungen festgestellt werden, dass sich für größere Blechdicken kein negativer Blechdickeneffekt einstellt. Mithilfe der numerischen Simulationen konnte bestätigt werden, dass für die mit bereits ungünstigen Markierparametern installierten Oberflächenkerben der Einfluss auf die Spannungskonzentration lokal stark begrenzt ist. Die betrachteten Kerben konnten als flache Kerben eingeordnet werden.

Nadelmarkierungen zeigen quasi keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten von Baustählen. Die Betrachtungen der experimentellen und numerischen Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, dass die ermüdungswirksame Schädigung infolge von Nadelmarkierungen als unkritisch einzustufen ist.

Zudem konnte in den Untersuchungen kein durchgängiger Einfluss der Streckgrenze auf die Ergebnisse festgestellt werden. Wenn ein entsprechender Effekt vorhanden ist, wirkt er sich auf Basis der ausgeprägteren geometrischen Parameter einer Kennzeichnung und den mit der Applikation verbundenen Streuungen für die betrachteten Stahlsorten lediglich untergeordnet aus.

Für die Einarbeitung der Ergebnisse in die Normung konnten Empfehlungen ausgearbeitet und präsentiert werden. Weiterhin wurden Vorschläge zur Einteilung der Kennzeichnungsmethoden in „hart“ und „weich“ erarbeitet. Sicher lassen sich danach die Methoden Hartes Stempeln und Fräsen als „harte Kennzeichnungen“ eingestuft werden. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass Plasmamarkierungen trotz optimierter Geometrie ebenfalls als „harte Kennzeichnungen“ klassifiziert werden sollten. Nadelmarkierungen können auch ohne Verwendung speziell abgerundeter Nadelspitzen als „weiche Kennzeichnungsmethode“ definiert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Allgemeines

Im gegenwärtigen Stahlbau gewinnen effektive und effiziente Kennzeichnungsmethoden immer mehr an Bedeutung. Die Kennzeichnung von Bauteilen dient der Qualitätskontrolle und der eindeutigen Identifizierbarkeit. In der Fertigung und Produktion von Stahltragwerken ist eine Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Herstellung bis zum Einbau und darüber hinaus nicht nur vorteilhaft, sondern normativ gefordert. Die für die Ausführung von Stahltragwerken anzuwendende Norm DIN EN 1090-2 fordert für Bauwerke der Ausführungsklasse EXC3 und EXC4 explizit die lückenlose Rückverfolgbarkeit von Bauteilen von der Lieferung bis zum Einbau, ohne dass die Aufbringung von dauerhaften Kennzeichnungen zu Beschädigungen des Bauteils führt. Harte Kennzeichnungsmethoden wie Hartprägungen, gebohrte oder gestanzte Markierungen sind nur zulässig für Stahlsorten des Festigkeitsbereiches bis einschließlich S355 und nur in festgelegten Bereichen, in denen die Markierung keinen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat. Der Deutsche Bahn Standard (DBS) 918 002-02 fordert zugleich eine Kennzeichnung von Form- und Stabstahl mit einem Gewicht von mehr als 15 kg/m mittels Schlagstempelung oder weiterer harter Kennzeichnungsmethoden, so dass derzeit unterschiedliche Forderungen zur Art der Markierung von Bauteilen existieren.

Eine Forderung nach dauerhaften Kennzeichnungsmethoden impliziert die Widerstandsfähigkeit der Markierungen gegenüber nachgeschalteten Fertigungsprozessen wie Strahlen, Beschichten oder Feuerverzinken sowie vor Witterungseinflüssen. Für eine dauerhafte Kennzeichnung eignen sich insbesondere Methoden wie Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren oder Nadeln. Diese Kennzeichnungssysteme erzeugen jedoch alle eine Oberflächenveränderung und hinterlassen eine Kerbe, welche einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten haben kann. Dieser Einfluss wurde bisher nicht im Detail untersucht, weshalb eine Einordnung der Markierkerben in den Europäischen Kerbfallkatalog nach DIN EN 1993-1-9 prinzipiell nicht möglich ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte der Einfluss dieser Kennzeichnungsmethoden auf Baustähle ermittelt werden. Mithilfe der durchgeführten Untersuchungen sollte ein Einblick in das Ermüdungsverhalten von mittels dauerhafter Kennzeichnungsmethoden behandelter Baustähle gewonnen werden. Zusätzlich war es das Ziel, auf Basis der Ergebnisse Empfehlungen zur Überarbeitung der Normen DIN EN 1090-2 und DIN EN 1993-1-9 zu erarbeiten.

Zunächst wurde der Stand der Technik zu temporären und dauerhaften Kennzeichnungsmethoden präsentiert. Die vier untersuchten Kennzeichnungsmethoden basieren auf unterschiedlichen Technologien, weshalb prozessbedingt deutliche Unterschiede zwischen den Kennzeichnungsmethoden festzustellen sind. Die Eigenschaften und Einflussparameter dieser Methoden wurden herausgearbeitet und kommentiert. Darüber hinaus wurde der Stand der Wissenschaft und Normung zur Ermüdungsfestigkeit von gekennzeichneten Bauteilen erörtert. In den aktuellen Normen existieren zum einen Restriktionen hinsichtlich der Nutzung von dauerhaften Kennzeichnungen, zum anderen teilweise aber auch widersprüchliche Anforderungen zur eindeutigen Identifizierbarkeit. Zudem sind die Normtexte teilweise unklar definiert, was zusätzliche Fragen in der Anwendung aufwirft. Insbesondere die Information, welche Kennzeichnungsmethoden als „hart“ und welche als „weich“ einzustufen sind, bleibt DIN EN 1090-2 schuldig. Wissenschaftliche Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten dauerhaft gekennzeichneten Baustähle im Speziellen konnten mit einer Ausnahme nicht eruiert werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zu plasmamarkierten Bauteilen wurden erläutert und kommentiert. Auf Basis des dargelegten Stand der Technik und Wissenschaft konnte gefolgert werden, dass der Einfluss der dauerhaften Kennzeichnungen auf die Ermüdungsfestigkeit von Baustählen eine dringend zu klärende Frage darstellt.

Experimentelle und numerische Untersuchungen

Zur experimentellen Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von dauerhaft markierten Baustählen wurden Ermüdungsversuche an mittels der vier Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen, Plasmamarkieren und Nadeln behandelten Prüfkörpern durchgeführt. Als Werkstoffe kamen je Markiermethode die im Brückenbau übliche Stahlsorte S355J2 sowie die Stahlsorte S460N zur Abdeckung eines über des in DIN EN 1090-2 zulässigen Festigkeitsbereichs zum Einsatz. Zur Untersuchung eines möglichen Blechdickeneffekts wurden je Markiermethode und

Stahlsorte Prüfkörper der Blechdicken 15, 25 und 40 mm untersucht. Ein Großteil der Untersuchungen wurde im Rahmen des IGF-Forschungsvorhabens „Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile“ durchgeführt. Zusätzlich wurden die im Rahmen von *Voruntersuchungen* zu diesem Forschungsvorhaben durchgeführten experimentellen Untersuchungen vorgestellt und soweit möglich zusammen mit den Ergebnissen der *Hauptuntersuchungen* im Rahmen des Forschungsvorhabens betrachtet.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen nahezu keinen Einfluss der Nadelmarkierungen auf das Ermüdungsverhalten. Die getesteten Versuchskörper versagten lediglich in zwei Fällen mit einem Rissausgang von der Nadelmarkierung unter vergleichsweise hohen Ermüdungsbeanspruchungen. Alle weiteren Versuchskörper versagten entweder mit einem Rissausgang im Grundmaterial, welcher nicht von der Markierung ausging oder erreichten fünf Millionen Lastwechsel ohne sichtbaren Riss.

Die Kennzeichnungsmethoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren zeigen hingegen einen deutlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten. In der Regel gingen die erzielten Ermüdungsbrüche von der erstellten Markierung aus. Lediglich bei Plasmamarkierungen konnten zum einen größere Streuungen der Versuchsergebnisse und zum anderen eine erhöhte Anzahl an Durchläufern festgestellt werden.

Die Bezugswerte der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln liegen für die untersuchten Versuchsserien zwischen $\Delta\sigma_{c,95\%} = 121 \text{ N/mm}^2$ für gestempelte Versuchskörper der Blechdicke 25 mm aus S460N und $\Delta\sigma_{c,95\%} = 232 \text{ N/mm}^2$ für gefräste Versuchskörper der Blechdicke 40 mm aus S355J2. Eine aufgrund der Versuchsergebnisse als sinnvoll erachtete Auswertung aller gestempelten Versuchskörper mit einer Blechdicke von 15 mm ergab eine Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_{c,95\%} = 113 \text{ N/mm}^2$. Diese erzielten Kerbfallklassen sind als vergleichsweise hoch einzustufen.

Innerhalb der Versuchsserien einer Markiermethode lässt sich für die Versuche kein negativer Blechdickeneffekt feststellen. Tendenziell steigt die Ermüdungsfestigkeit für die untersuchten Prüfkörper mit zunehmender Blechdicke an. Mithilfe numerischer Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass es sich bei den eingebrachten Kerben für die untersuchten Blechdicken um lediglich lokale Störungen handelt und daher kein negativer geometrischer Blechdickeneffekt zu erwarten

ist. Statistische oder technologische Blechdickeneffekte sind damit nicht ausgeschlossen, konnten aber im Rahmen dieser Untersuchungen nicht festgestellt werden.

Zur Einordnung der Ergebnisse aus den Ermüdungsversuchen wurden an den gekennzeichneten Versuchskörpern Messungen mittels fokusvariiender Mikroskopie durchgeführt. Damit ist es möglich, zerstörungsfrei dreidimensionale Modelle der durch die dauerhaften Kennzeichnungsmethoden eingebrachten Kerben zu erstellen. Die Auswertungen der so erstellten 3D-Modelle haben ergeben, dass jede der vier Kennzeichnungsmethoden eine unterschiedliche Kerbgeometrie erzeugt.

Charakteristische Merkmale der Markierkerben durch Hartes Stempeln sind besonders scharfe Kanten bzw. Übergänge zwischen dem Grundmaterial und der Kerbe, mit vergleichsweise glattwandigen Wangenflächen. In der Regel zeichnen sich Harte Stempelungen durch spitz zulaufende Markierkerben mit kleinen Radien im Kerbgrund aus. Die Oberfläche der Kennzeichnung entspricht dabei im Wesentlichen dem Negativ des eingesetzten Stempels.

Fräsmarkierungen zeichnen sich dagegen durch vergleichsweise raue Oberflächen aus. Die generelle Form der Markierung ist abhängig von der Geometrie des eingesetzten Fräswerkzeuges. Die gefrästen Kerben sind zum einen somit stark abhängig von der Geometrie, zum anderen aber auch von der Schärfe des eingesetzten Werkzeuges. Mithilfe der erstellten Modelle konnte gezeigt werden, dass infolge des Fräsvorgangs darüber hinaus durch Verformung und Verteilung des Materials vergleichsweise scharfe Mikrokerben und Grate entstehen, welche für eine erhöhte Spannungskonzentration verantwortlich sein können. Obwohl die jeweiligen Kennzeichnungen für alle Versuchskörper mit gleichen Parametern hergestellt werden sollten, musste für die gefrästen Markierungen hiervon abgewichen werden. Daher haben die Untersuchungen unterschiedliche Markiertiefen für Fräsmarkierungen der Versuchskörper aus S355J2 und S460N ergeben.

Anhand der Untersuchungen zu Plasmamarkierungen konnte festgestellt und bestätigt werden, dass sich die Kennzeichnungen in Ansatz-, End- und Umkehrpunkten des Plasmamarkierbrenners grundlegend vom restlichen Bereich der Markierung unterscheiden, da in diesen Bereichen die geringfügig längere Verweildauer des Brenners dafür sorgt, dass mehr Material aufgeschmolzen wird und die Markierung somit eine tiefere Kerbe im Material hervorruft. Diese Punkte haben sich ebenfalls als ermüdungswirksam herausgestellt. Plasmamarkierungen weisen

im Allgemeinen eine halbelliptische Form auf. Die Wangenflächen sind vergleichsweise glatt. Bei höheren Stromstärken oder kleineren Markiergeschwindigkeiten werden die Flanken der Markierung deutlich steiler, im Kerbgrund bleibt allerdings ein großer Radius. Infolge des Prozesses des Plasmamarkierens härtet allerdings die oberflächennahe Schicht des Materials auf, was zu einem weniger duktilen Verhalten und somit zu einer Herabsetzung der Ermüdungsfestigkeit führen kann.

Nadelmarkierungen produzieren im Allgemeinen eine halbrunde punktförmige Kerbe. Die Markierungen entsprechenen hierbei dem Negativ der eingesetzten Nadel. Die untersuchten Nadelmarkierungen weisen trotz einer nicht speziell abgerundeten Nadelspitze eine fast perfekt runde Form auf. Der Radius im Kerbgrund ist als vergleichsweise groß zu werten.

Die aus den Untersuchungen ermittelten Markiertiefen reichten in den extremen Fällen von $t_k = 300 \mu\text{m}$ für Nadelmarkierungen bis $t_k = 1300 \mu\text{m}$ für Stempelmarkierungen.

Im Rahmen der numerischen Untersuchungen wurden zunächst aus den dreidimensionalen Modellen charakteristische geometrische Eigenschaften erarbeitet, welche dann in ein parametrisiertes Modell mit idealisierten Kerben eingearbeitet wurden. Als zur Beschreibung der Geometrie benötigte Parameter konnten die Kerbtiefe t_k , der Kerbradius r_k sowie der Öffnungswinkel α_k bestimmt werden. Auf Basis dieser Daten wurden Kerbspannungsfaktoren zur Ermittlung der Spannungskonzentration im unmittelbaren Bereich der Kerbe bestimmt. Kerbspannungsfaktoren berücksichtigen auf Basis linear-elastischer Betrachtungen die Erhöhung der Spannung infolge einer Kerbe im Vergleich zur Nennspannung. Anhand der ermittelten Kerbspannungsfaktoren konnte gezeigt werden, dass auf Basis der den Berechnungen zugrunde gelegten Randbedingungen sowohl der Öffnungswinkel der Kerbe als auch die Dicke des betrachteten Blechstreifens eine untergeordnete Rolle für die Höhe des Kerbspannungsfaktors spielt. Als maßgebende Parameter der Spannungskonzentration konnten die Kerbtiefe t_k sowie der Kerbradius r_k bestätigt werden. Besonders für große Kerbtiefen und kleine Kerbradien zeigen sich erwartungsgemäß hohe Spannungskonzentrationsfaktoren.

Anhand von Berechnungen mit real-plastischem Materialgesetz konnte allerdings auch bestätigt werden, dass Spannungskonzentrationsfaktoren die ermüdungswirksame Schädigung durch die Oberflächenkerben teilweise deutlich überschätzen.

Dies liegt insbesondere daran, dass sich die lokalen Spannungsspitzen durch die Duktilität des Baustahls umlagern können und so nicht in voller Höhe wirksam werden. Besonders für kleine Radien und große Kerbtiefen ergeben sich infolge einer linear-elastischen Betrachtung erheblich zu große Spannungen, so dass die Kerbspannungsfaktoren allein zur Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit nicht zielführend sind.

Aufgrund dieses bekannten Verhaltens wurden Kerbwirkungszahlen bestimmt, welche dem Umstand der Mikrostützwirkung insofern Rechnung tragen, als dass anhand des Spannungsgradienten im Bereich des Kerbgrundes Stützziffern zur Abminderung der Kerbspannungsfaktoren bestimmt werden. Für runde Kerben können die bezogenen Spannungsgefälle über den Kerbradius bestimmt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Spannungsgefälle mithilfe des FE-Modells für jede ermittelte Kerbwirkungszahl für die geometrischen Parameter bestimmt. Die so ermittelten Kerbwirkungszahlen überschätzen zwar für kleine Kerbradien und große Kerbtiefen immer noch die real-plastischen Spannungen, allerdings konnte eine hinreichende Korrelation festgestellt werden.

Empfehlungen zur Überarbeitung der Normen

Auf Basis aller vorhandenen Versuchsdaten konnten Empfehlungen für die Überarbeitung der Normen erarbeitet und präsentiert werden. Vorschläge zur Lockerung von Restriktionen der DIN EN 1090-2 wurden erarbeitet und dargelegt. Zudem wurden Vorschläge zur Einteilung der untersuchten Kennzeichnungsmethoden in „hart“ und „weich“ erläutert. Demnach lassen sich Nadelprägungen als Weichprägungen einstufen, unabhängig davon, ob speziell ausgerundete Nadelspitzen zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit verwendet wurden. Alle weiteren Kennzeichnungsmethoden sind den „Hartprägungen“ zuzuordnen. Obwohl für die Plasmamarkierungen vergleichsweise kleine Kerbwirkungszahlen bestimmt wurden, haben sich in den experimentellen Untersuchungen nicht immer dementsprechend hohe Ermüdungsfestigkeiten ergeben. Diese Diskrepanz wird mit der Aufhärtung der Randschicht durch den Plasmamarkierprozess erklärt. Dadurch können sich die Spannungen nicht mehr vollumfänglich umlagern, wodurch die ermüdungswirksame Schädigung nicht so stark abgebaut werden kann. Dieses Verhalten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht gesondert untersucht, wird jedoch als durchaus plausibel angenommen.

Für eine Einarbeitung einer Kerbfallklasse für gekennzeichnete Bauteile in den Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 wurde ein erster Vorschlag vorgestellt, welcher zu diskutieren ist. Für die Methoden Hartes Stempeln, Fräsen und Plasmamarkieren wurden einheitliche Kerbfallklassen vorgeschlagen. Unter den für die Versuche zugrunde gelegten Randbedingungen wurde für Bleche mit einer Dicke größer oder gleich 15 mm und kleiner 40 mm eine Kerbfallklasse 100 vorgeschlagen. Für Bleche der Dicke größer oder gleich 40 mm eine Kerbfallklasse von 160. Bei der Anwendung wäre derzeit allerdings zu überprüfen, ob die Markierparameter innerhalb der hier untersuchten Grenzen liegen.

Ausblick

Die präsentierten experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit basieren auf Ermüdungsversuchen mit einstufigem Lastkollektiv, einem Spannungsverhältnis von $R = 0,1$ sowie in der Regel je Methode einheitlicher Kennzeichnungsparameter. Zudem lagen die ermittelten Bruchlastwechselzahlen teilweise im mittleren Zeitfestigkeitsbereich, weshalb die Wöhlerlinien zur Bestimmung der Kerbfallklassen mit einem Bezugswert der Ermüdungsfestigkeit bei zwei Millionen Lastwechseln extrapoliert wurden. Für diese Serien wäre eine gezieltere Untersuchung mit Ermüdungsversuchen im unteren Zeitfestigkeitsbereich oder zur Ermittlung der Dauerfestigkeit sinnvoll. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die Extrapolation teilweise zu konservative Ermüdungsfestigkeiten abgeschätzt wurden.

Die ermittelten Kerbfallklassen beruhen in der Regel auf Versuchsserien mit weniger als zehn geprüften Versuchskörpern bzw. statistisch relevanten Ergebnissen. Um die ermittelten Kerbfallklassen abzusichern, könnten weitere Untersuchungen zur Erhöhung der Stichprobenanzahl durchgeführt werden, wenngleich in der Regel mit der vorhandenen Anzahl an Versuchskörpern aussagekräftige Wöhlerlinien ermittelt werden konnten. Auf Basis weiterer Untersuchungen könnten zudem die dokumentierten Unregelmäßigkeiten der Versuchsserien weiter analysiert und geklärt werden.

Weiterhin wird es als durchaus sinnvoll erachtet, numerische Studien mit nicht idealisierten Kerben durchzuführen. Hierzu könnten die Daten der im Rahmen dieser Arbeit ermittelten dreidimensionalen Modelle herangezogen werden. Da diese zwar dreidimensional vorliegen, allerdings nicht die Extraktion von

dreidimensionalen Koordinaten zulassen, wären alternativ weitere Untersuchungen mittels multidirektionaler fokusvariiender Mikroskopie anzustreben. Eine Ermittlung der Kerbwirkungszahl auf Basis der Realgeometrie kann unter Umständen eine verbesserte Korrelation bewirken, wenngleich der Rechenaufwand durch die importierten Geometrien deutlich ansteigen würde.

Zielführend wären darüber hinaus Untersuchungen zur Randschichthärte der plasmamarkierten Versuchskörper. Mithilfe von Härtemessungen innerhalb der Markierspur ließen sich die hier vorgestellten Vermutungen zur Randschichtaufhärtung verifizieren. Denkbar wäre dann auch ein Korrekturfaktor für die ermittelten Kerbwirkungszahlen.

Literatur

- [1] **DIN EN 1090-2:2011-10**, Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Regeln für die Ausführung von Stahltragwerken; Deutsche Fassung EN 1090-2:2008+A1:2011.
- [2] **DIN 18800-7:2008-11**, Stahlbauten – Teil 7: Ausführung und Herstellerqualifikation.
- [3] **DIN EN 1993-1-9:2010-12**, Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005 + AC:2009.
- [4] **Stranghöner, N., Jungbluth, D.:** DAST-Forschungsbericht 2/2015. Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2017.
- [5] **Stranghöner, N., Berg, J.:** Kennzeichnung und Rückverfolgung im Stahlbau. Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau - Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingbert Mangerig 10/6 (2010), S. 141–148.
- [6] **Voortman Steel Machinery.** URL: <http://www.voortman.net/de/produkte/maschinen/tragerbearbeitung/v704>.
- [7] **Fahrenwaldt, H., Schuler, V.:** Praxiswissen Schweißtechnik. Werkstoffe, Prozesse, Fertigung. 4., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer-Verlag GmbH, 2011.
- [8] **Radaj, D., Vormwald, M.:** Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. 3., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2007.
- [9] **Richard, H. A., Sander, M.:** Ermüdungsrisse. Erkennen, sicher beurteilen, vermeiden. 2. Aufl. 2012. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [10] **Maddox, S. J.:** Fatigue strength of welded structures. 2nd Edition. Cambridge: Abington Publishing und Abington Pub., 1991.

- [11] **DIN EN 1011-1:2009-07**, Schweißen – Empfehlungen zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 1: Allgemeine Anleitungen für das Lichtbogenschweißen; Deutsche Fassung EN 1011-1:2009.
- [12] **ZTV-ING:2012-12**, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 4 Stahlbau, Stahlverbundbau.
- [13] **DBS 918 002-02:2013-01**, DB Standard. Technische Lieferbedingungen. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen für den Eisenbahnbrückenbau.
- [14] **FprEN 1090-2:2017-10**, Execution of steel structures and aluminium structures — Part 2: Technical requirements for steel structures, Final Draft.
- [15] **Schmidt, H., Zwätz, R. u. a.:** Ausführungen von Stahlbauten. Kommentare zu DIN EN 1090-1 und DIN EN 1090-2. 1. Auflage. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG und Beuth Verlag, 2010.
- [16] **Kranz, B., Wolski, U.:** Einsatzmöglichkeiten und -grenzen des Plasmaparkierens für sichere Schweißkonstruktionen, Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, Bericht über Forschungsleistungen – Abschlussbericht. Berlin: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH, 2010.
- [17] **Brozetti, J., Hirt, M. A. u. a.:** Background informations on fatigue design rules - Statistical evaluation. Background documentation Chapter 9 - Document 9.01. Hrsg. von Eurocode 3 Editorial Group. Version First Draft. 1989.
- [18] **Hobbacher, A.:** Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Second edition. Springer-Verlag GmbH, 2016.
- [19] **Jungbluth, D., Stranghöner, N.:** Ermüdungsfestigkeit markierter Stahlbauteile. 19. DASt-Kolloquium, Deutscher Ausschluß für Stahlbau, Hannover, 27.-28. Oktober 2014 (2014), S. 70–74.
- [20] **Stranghöner, N., Jungbluth, D.:** Fatigue strength of marked steel components. Procedia Engineering. Fatigue Design 2015, International Conference Proceedings, 6th Edition 133 (2015), S. 282–293.
- [21] **Stranghöner, N., Jungbluth, D.:** Fatigue strength of marked steel components. Influence of durable marking methods on the fatigue strength of steel components. Steel Construction 8 (2015) Heft 3, S. 201–209.

- [22] **DIN EN 10025-2:2005-04**, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle; ; Deutsche Fassung EN 10025-2:2004.
- [23] **DIN EN 10025-3:2005-02**, Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte/normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsche Fassung EN 10025-3:2004.
- [24] **DIN 50125:2009-07**, Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben.
- [25] **DIN EN ISO 25178-6:2010-06**, Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 6: Klassifizierung von Methoden zur Messung der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-6:2010); Deutsche Fassung EN ISO 25178-6:2010.
- [26] **Schijve, J.:** Fatigue of Structures and Materials. 2. Auflage. Dordrecht: Springer-Verlag GmbH, 2009.
- [27] **Schijve, J.:** Stress gradients around notches. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures 3 (1980) Heft 4, S. 325–338.
- [28] **Neuber, H.:** Kerbspannungslehre. Theorie der Spannungskonzentration. Genaue Berechnung der Festigkeit. 3. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 1985.
- [29] **Pilkey, W. D., Pilkey, D. F. u. a.:** Peterson's stress concentration factors. Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2008.
- [30] **Peterson, R. E.:** Stress concentration factors. Charts and relations useful in making strength calculations for machine parts and structural elements. New York: Wiley, 1974.
- [31] **Susmel, L., Taylor, D.:** The Theory of Critical Distances to estimate lifetime of notched components subjected to variable amplitude uniaxial fatigue loading. International Journal of Fatigue 33 (2011) Heft 7, S. 900–911.
- [32] **Susmel, L., Taylor, D.:** A critical distance/plane method to estimate finite life of notched components under variable amplitude uniaxial/multiaxial fatigue loading. International Journal of Fatigue 38 (2012), S. 7–24.

- [33] **Susmel, L., Taylor, D.:** The Theory of Critical Distances to estimate finite lifetime of notched components subjected to constant and variable amplitude torsional loading. *Engineering Fracture Mechanics* 98 (2013), S. 64–79.
- [34] **Susmel, L., Taylor, D. u. a.:** The theory of critical distances and the estimation of notch fatigue limits: L, a0 and open notches. *Proceedings of ICCES 07 (2007) Heft Vol. 1, No. 2*, S. 81–86.
- [35] **Taylor, D.:** The theory of critical distances. *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) Heft 7, S. 1696–1705.
- [36] **Taylor, D.:** Applications of the theory of critical distances in failure analysis. *Engineering Failure Analysis* 18 (2011) Heft 2, S. 543–549.
- [37] **Taylor, D., Bologna, P. u. a.:** Prediction of fatigue failure location on a component using a critical distance method. *International Journal of Fatigue* 22 (2000) Heft 9, S. 735–742.
- [38] **Louks, R., Susmel, L.:** The linear-elastic Theory of Critical Distances to estimate high-cycle fatigue strength of notched metallic materials at elevated temperatures. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 38 (2015) Heft 6, S. 629–640.
- [39] **Taylor, D.:** A mechanistic approach to critical-distance methods in notch fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 24 (2001) Heft 4, S. 215–224.
- [40] **Adib-Ramezani, H., Pluinage, G.:** Theoretical and numerical aspects of the volumetric approach for fatigue life prediction in notched components. *International Journal of Fatigue* 25 (2003) Heft 1, S. 67–76.
- [41] **Adib-Ramezani, H., Jeong, J.:** Advanced volumetric method for fatigue life prediction using stress gradient effects at notch roots. *Computational Materials Science* 39 (2007) Heft 3, S. 649–663.
- [42] **Atzori, B.:** Cracks and notches. *International Journal of Fatigue* 23 (2001) Heft 4, S. 355–362.
- [43] **Chiandussi, G., Rossetto, M.:** Evaluation of the fatigue strength of notched specimens by the point and line methods with high stress ratios. *International Journal of Fatigue* 27 (2005) Heft 6, S. 639–650.

- [44] **Livieri, P., Tovo, R.:** Fatigue limit evaluation of notches, small cracks and defects. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 27 (2004) Heft 11, S. 1037–1049.
- [45] **Negru, R., Serban, D. A. u. a.:** Lifetime prediction in medium-cycle fatigue regime of notched specimens. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 84 (2016), S. 140–148.
- [46] **Susmel, L.:** The theory of critical distances. *Engineering Fracture Mechanics* 75 (2008) Heft 7, S. 1706–1724.
- [47] **Taylor, D., Wang, G.:** The validation of some methods of notch fatigue analysis. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 23 (2000) Heft 5, S. 387–394.
- [48] **Taylor, D.:** Geometrical effects in fatigue: a unifying theoretical model. *International Journal of Fatigue* 21 (1999) Heft 5, S. 413–420.
- [49] **Autodesk GmbH:** Inventor Professional. Version 2017.
- [50] **CADFEM GmbH:** ANSYS Workbench. Version 17.2. URL: <http://www.cadfem.de/produkte/ansys/ansys-workbench.html>.
- [51] **Haibach, E.:** Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 3., korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH, 2006.
- [52] **Verein Deutscher Eisenhüttenleute:** Steel. A handbook for materials research and engineering. 1. Fundamentals. Berlin: Springer-Verlag GmbH, 1992.
- [53] **Siebel, E., Stieler, M.:** Ungleichförmige Spannungsverteilung bei schwingender Beanspruchung. VDI-Z 97 (1955), S. 121–126.
- [54] **FKM-Richtlinie:** Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen; Forschungskuratorium Maschinenbau (FKM). 6., überarb. Ausgabe. Frankfurt am Main: VDMA-Verlag GmbH, 2012.
- [55] **Maddox, S. J.:** The effect of plate thickness on the fatigue strength of fillet welded joints. Cambridge: The Welding Institute, 1987.
- [56] **Örjasäter, O.:** Effect of plate thickness on fatigue of welded components. International Institute of Welding, 1995.

- [57] **Costa Borges, L. A.:** Size effects in the fatigue behaviour of tubular bridge joints. en. Dissertation. Schweiz: EPFL, 2008.

A Typische geometrische Parameter von Kerben infolge dauerhafter Kennzeichnungen

A.1 Hauptuntersuchungen

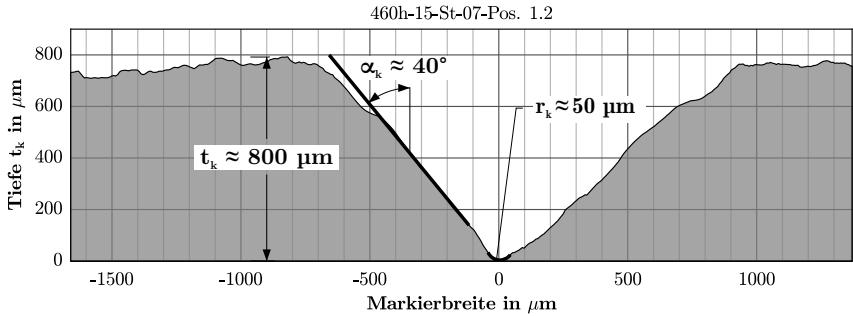


Abb. A.1 Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der *Hauptuntersuchungen* als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

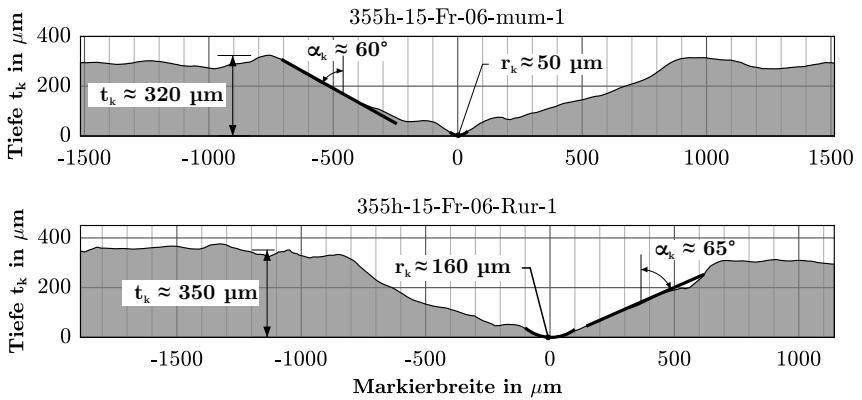


Abb. A.2 Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der *Hauptuntersuchungen* aus S355J2 als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

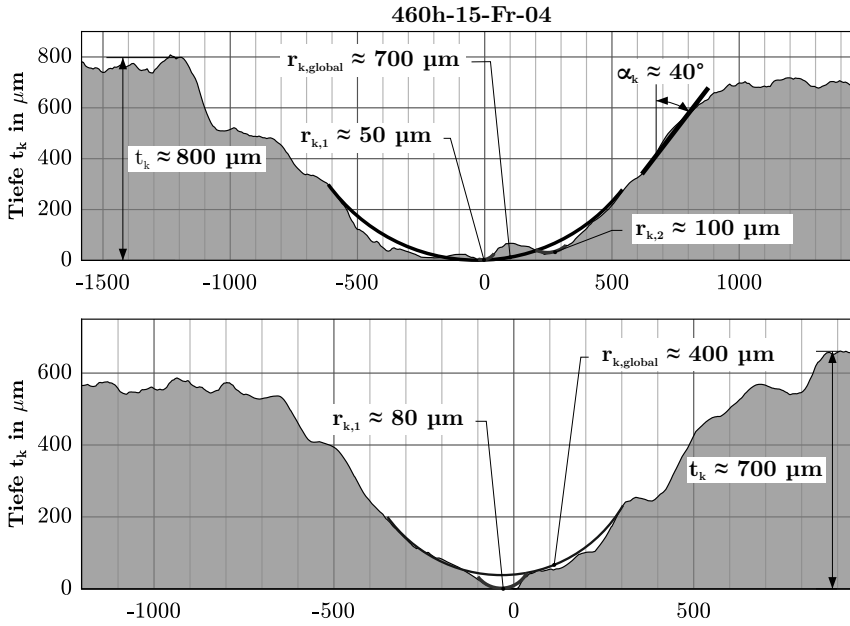


Abb. A.3 Geometrische Parameter zweier Fräsmarkierungen der *Hauptuntersuchungen* aus S460N als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

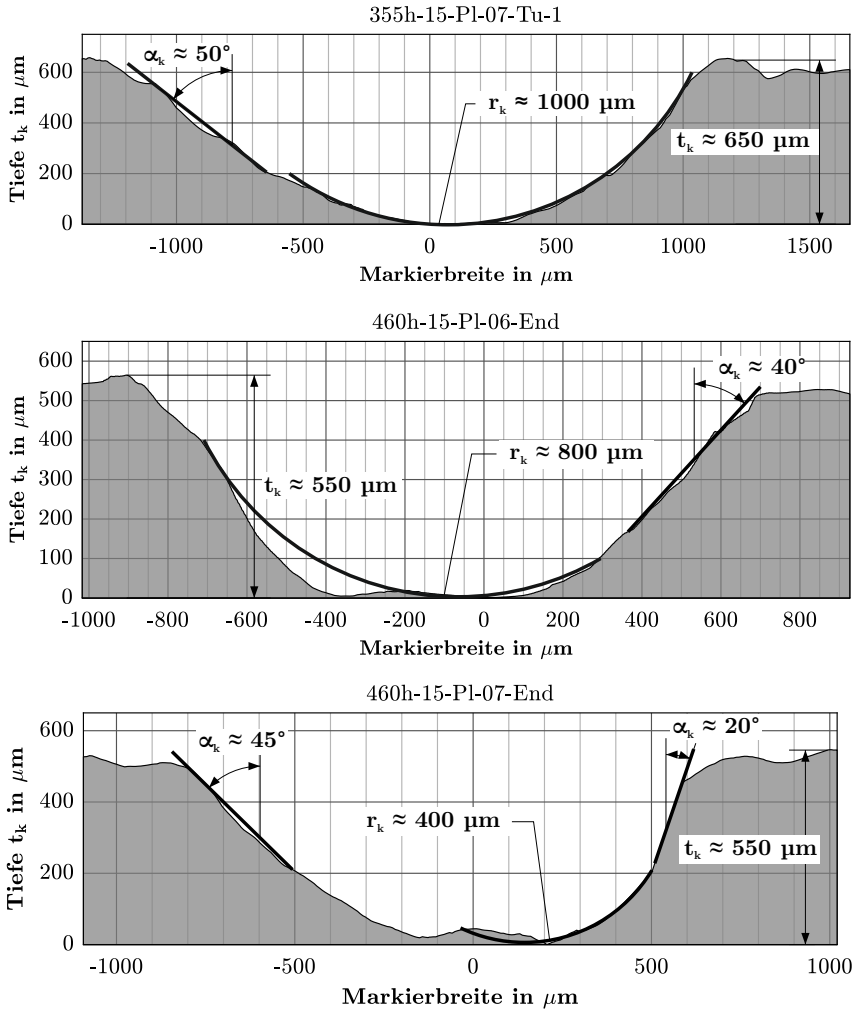


Abb. A.4 Geometrische Parameter einer Plasmamarkierung der *Hauptuntersuchungen* als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

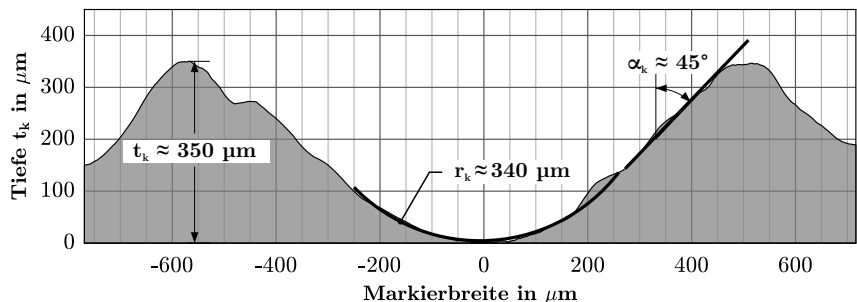


Abb. A.5 Geometrische Parameter einer Nadelmarkierung als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

A.2 Voruntersuchungen

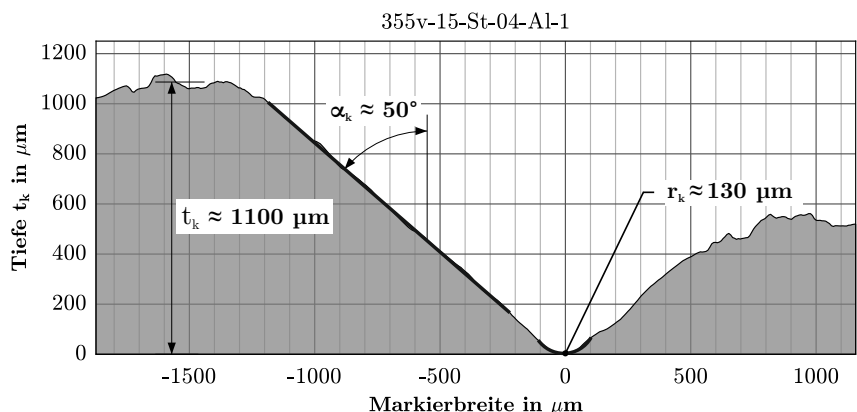


Abb. A.6 Geometrische Parameter einer Stempelmarkierung der Voruntersuchungen als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

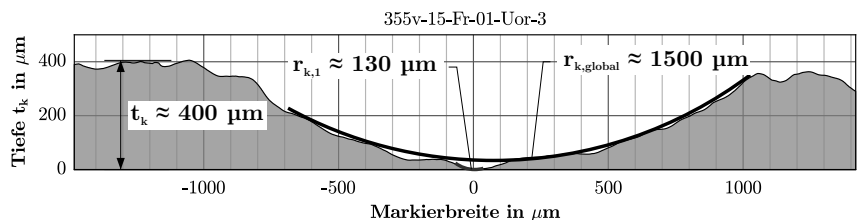


Abb. A.7 Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der Voruntersuchungen als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

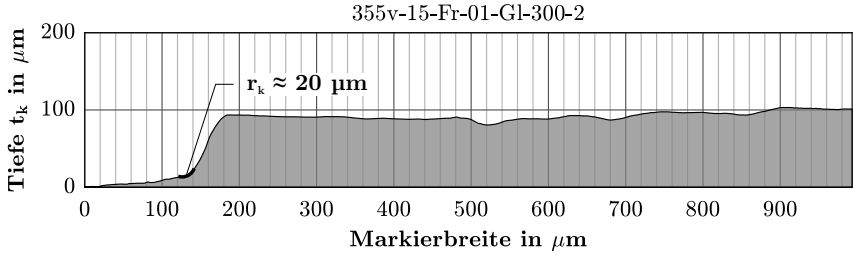


Abb. A.8 Geometrische Parameter einer Fräsmarkierung der *Voruntersuchungen* als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

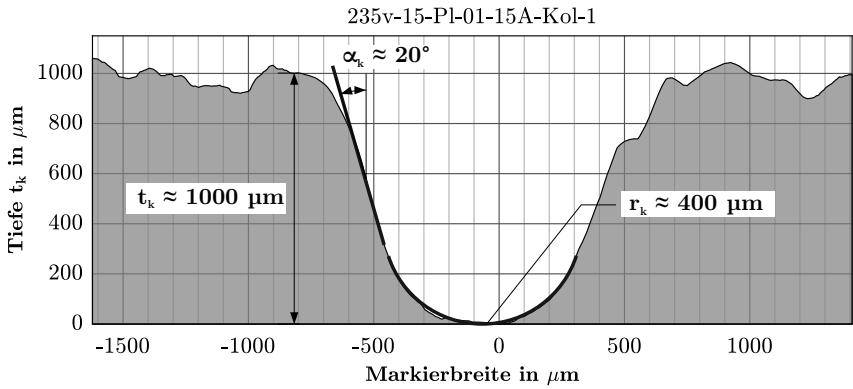


Abb. A.9 Geometrische Parameter einer Plasmamarkierung der *Voruntersuchungen* als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

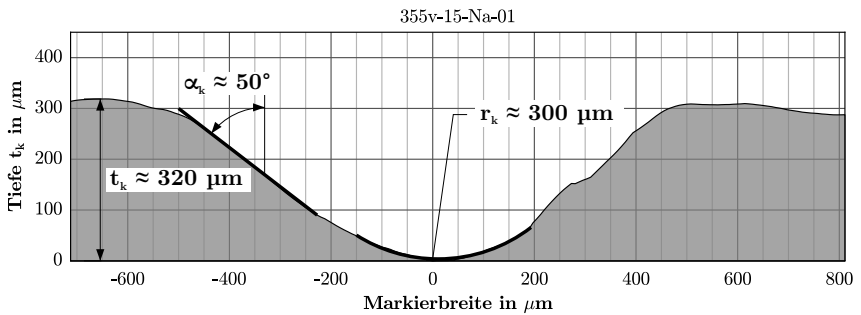


Abb. A.10 Geometrische Parameter einer Nadelmarkierung der *Voruntersuchungen* als Eingangsgrößen für FE-Berechnungen

B Datenblätter einzelner Versuchsserien

B.1 Hauptuntersuchungen

Tab. B.1 Datenblatt Versuchsserie S355h-15-St

Versuchsparameter und -ergebnisse			
Blechdicke:	15 mm	Anzahl n:	9
Stahlsorte:	S355J2	Neigung m:	2,9 (variabel)
f_y :	355 N/mm ²	$\Delta\sigma_{c,95\%}$:	136 N/mm ²
R_{eH} :	398 N/mm ²	$\Delta\sigma_{c,50\%}$:	147 N/mm ²
R_{eM} :	540 N/mm ²	$\Delta\sigma_{c,5\%}$:	158 N/mm ²
Prüfzeugnis:	APZ 3.1	T_σ :	1:1,16
$R = \sigma_u / \sigma_o$:	0,1		
Beanspruchungsart:	zugschwellend		

Wöhlerdiagramm

Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in MPa

Stress range histogram: 354812

Specimen: S355J2, t = 15 mm, Hartes Stempeln, R = 0,1; $\sigma = N/A$

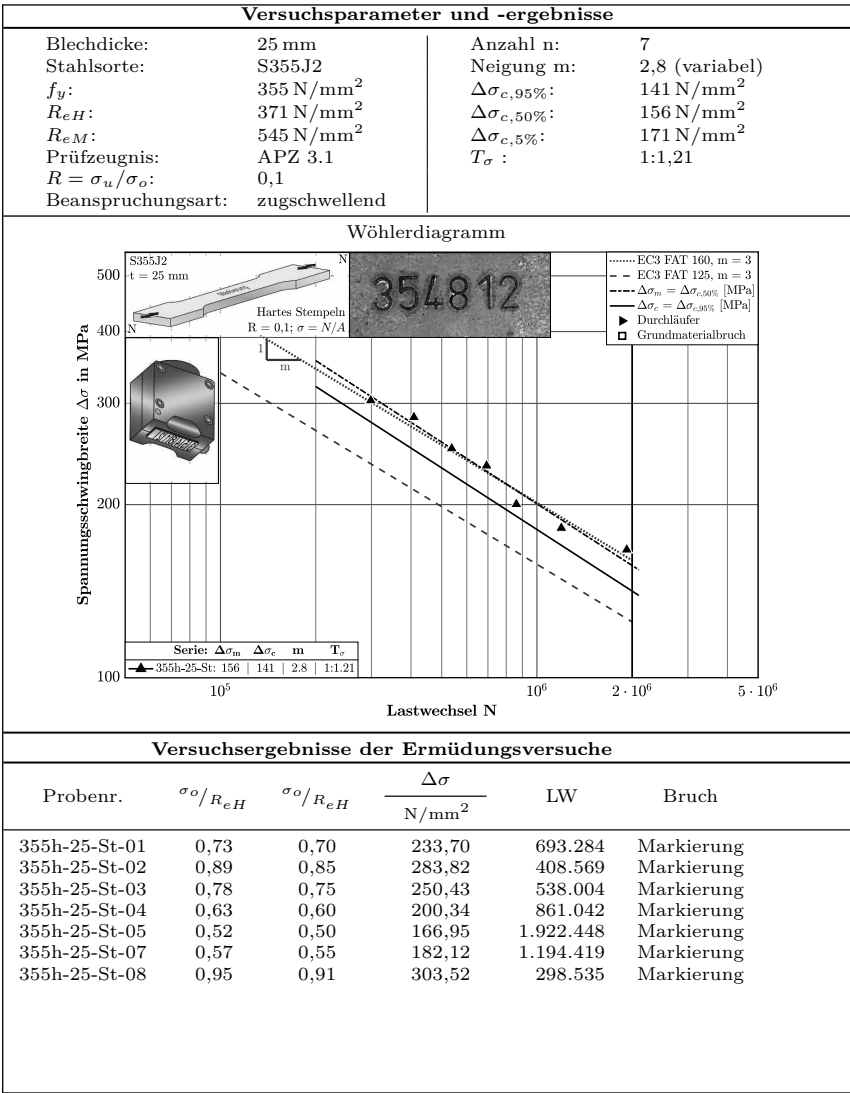
Series: $\Delta\sigma_m$ 147, $\Delta\sigma_c$ 136, m 2,9, T_σ 1:1,16

Legend:
 EC3 FAT 160, m = 3
 - - - EC3 FAT 125, m = 3
 - - - $\Delta\sigma_m = \Delta\sigma_{c,90\%}$ [MPa]
 - - - $\Delta\sigma_c = \Delta\sigma_{c,95\%}$ [MPa]
 ► Durchläufer

Lastwechsel N

Versuchsergebnisse der Ermüdungsversuche					
Probenr.	σ_o / R_{eH}	σ_o / R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{N/\text{mm}^2}$	LW	Bruch
355h-15-St-01	0,73	0,65	232,80	519.282	Markierung
355h-15-St-02	0,78	0,70	250,74	493.260	Markierung
355h-15-St-03	0,84	0,75	268,65	350.662	Markierung
355h-15-St-04	0,67	0,60	214,92	566.220	Markierung
355h-15-St-05	0,56	0,50	179,10	1.020.312	Markierung
355h-15-St-06	0,95	0,85	304,47	226.205	Markierung
355h-15-St-07	0,45	0,40	143,28	2.227.857	Markierung
355h-15-St-08	0,50	0,45	159,75	1.647.016	Markierung
355h-15-St-09	0,67	0,60	214,07	719.750	Markierung

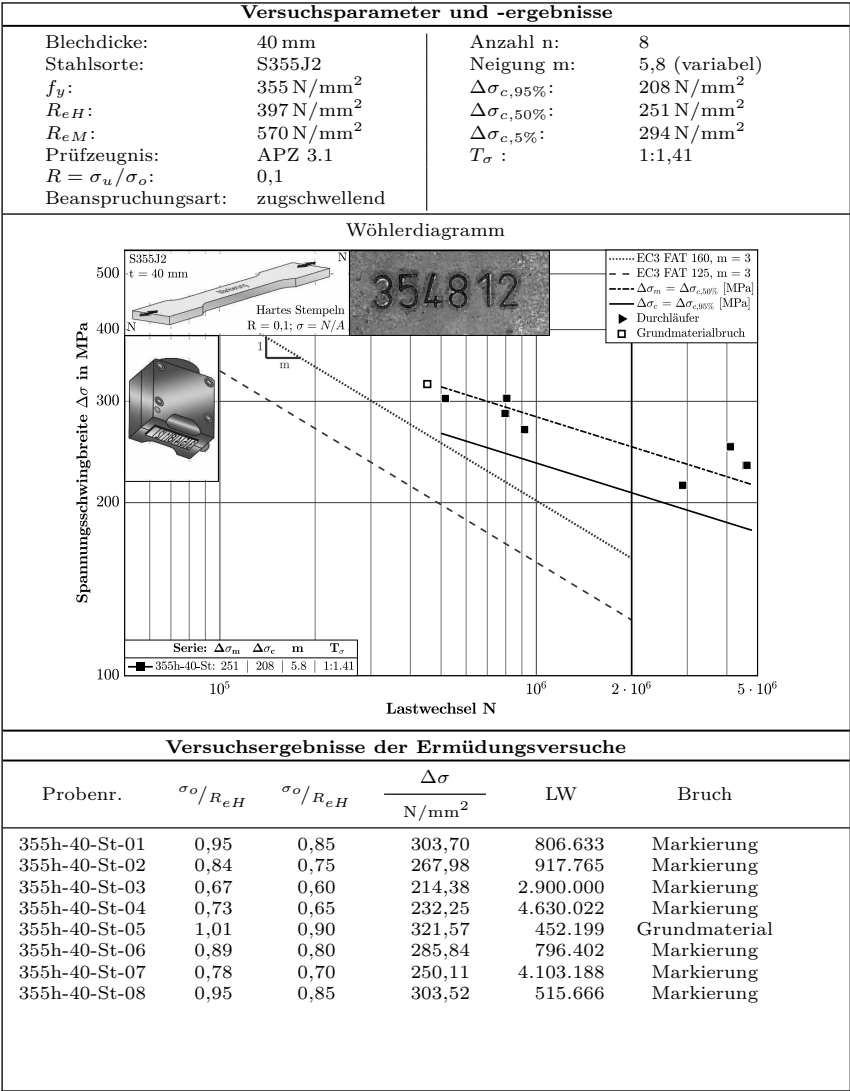
Tab. B.2 Datenblatt Versuchsserie S355h-25-St



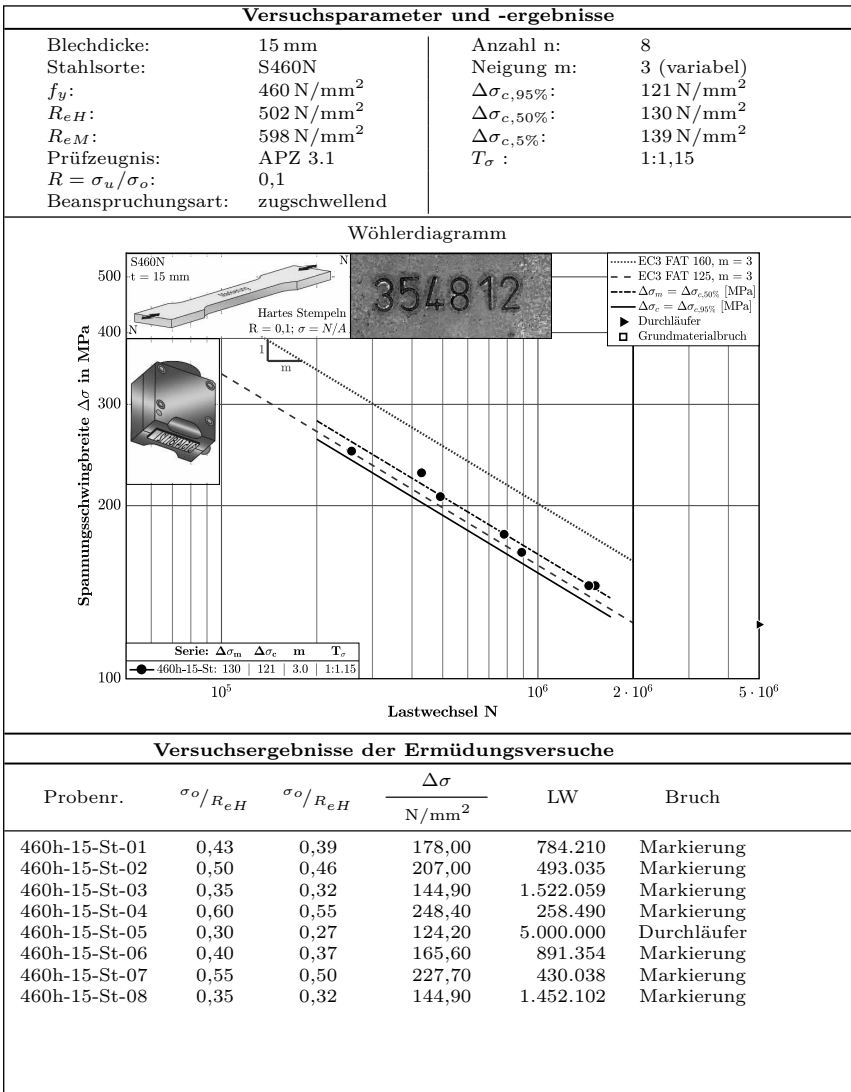
Versuchsergebnisse der Ermüdungsversuche

Probenr.	σ_o/R_{eH}	σ_o/R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{N/mm^2}$	LW	Bruch
355h-25-St-01	0,73	0,70	233,70	693.284	Markierung
355h-25-St-02	0,89	0,85	283,82	408.569	Markierung
355h-25-St-03	0,78	0,75	250,43	538.004	Markierung
355h-25-St-04	0,63	0,60	200,34	861.042	Markierung
355h-25-St-05	0,52	0,50	166,95	1.922.448	Markierung
355h-25-St-07	0,57	0,55	182,12	1.194.419	Markierung
355h-25-St-08	0,95	0,91	303,52	298.535	Markierung

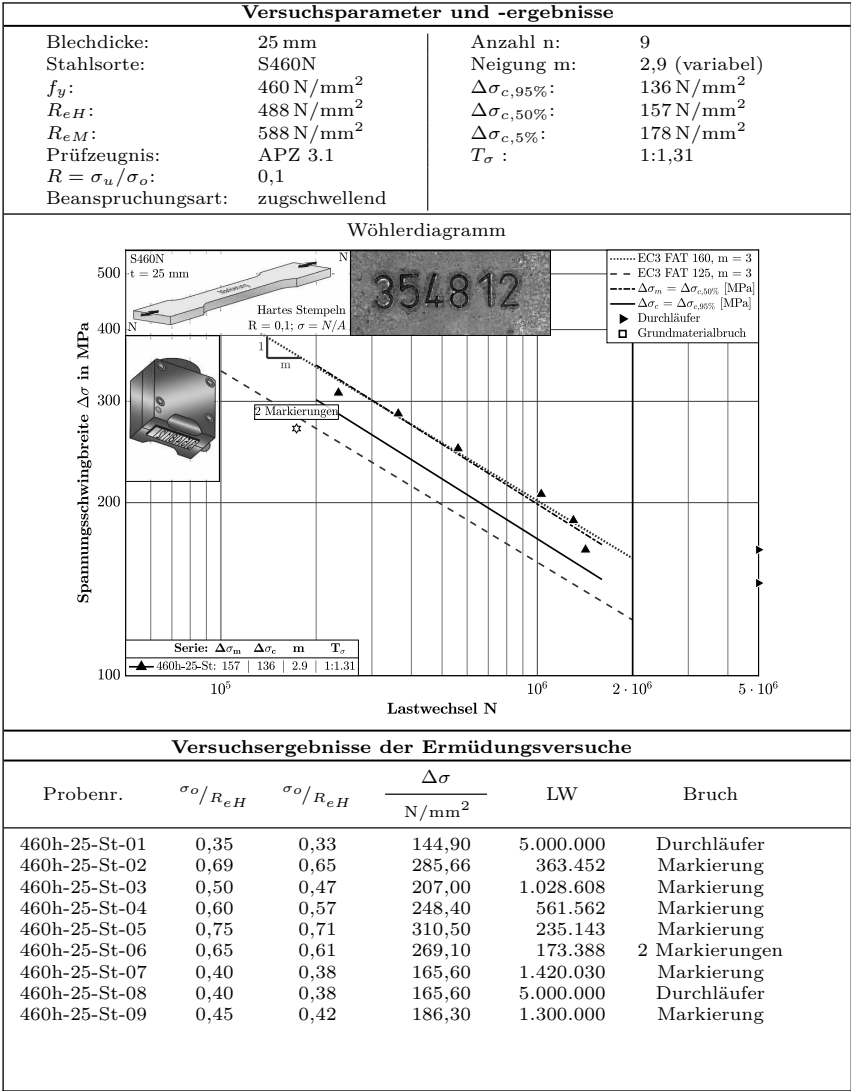
Tab. B.3 Datenblatt Versuchsserie S355h-40-St



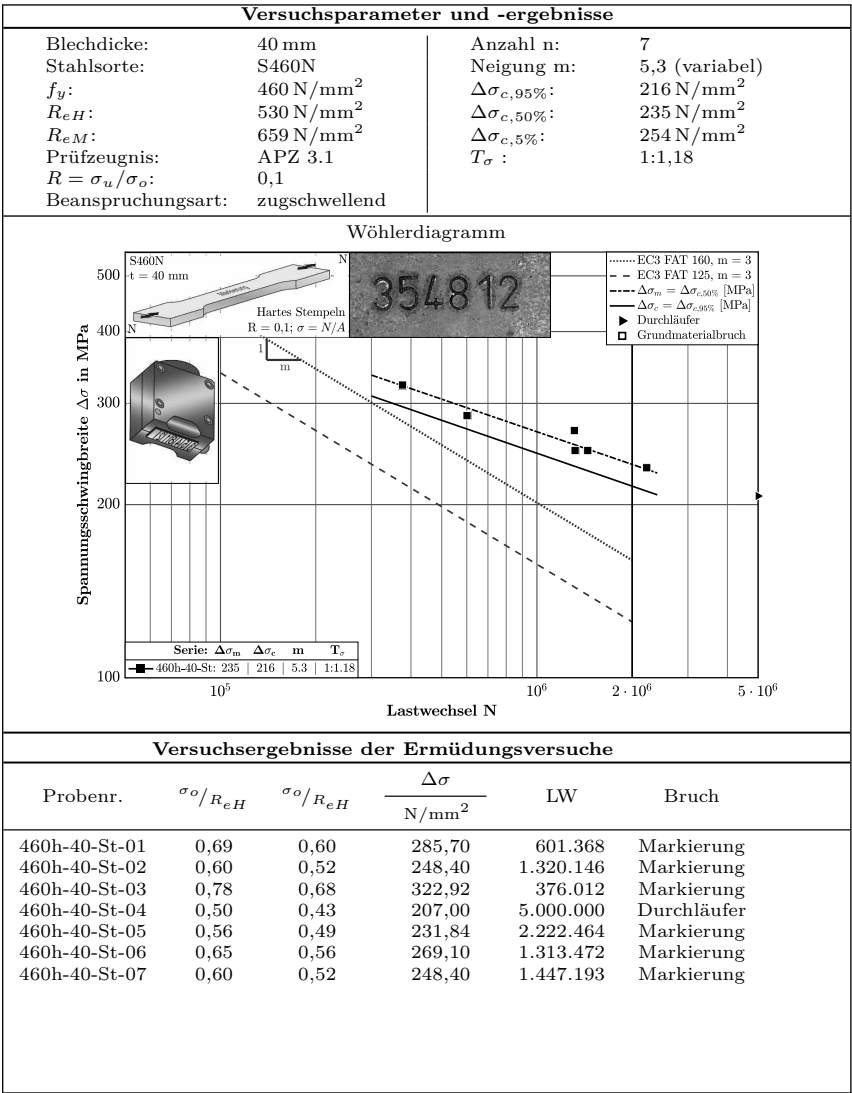
Tab. B.4 Datenblatt Versuchsserie S460h-15-St



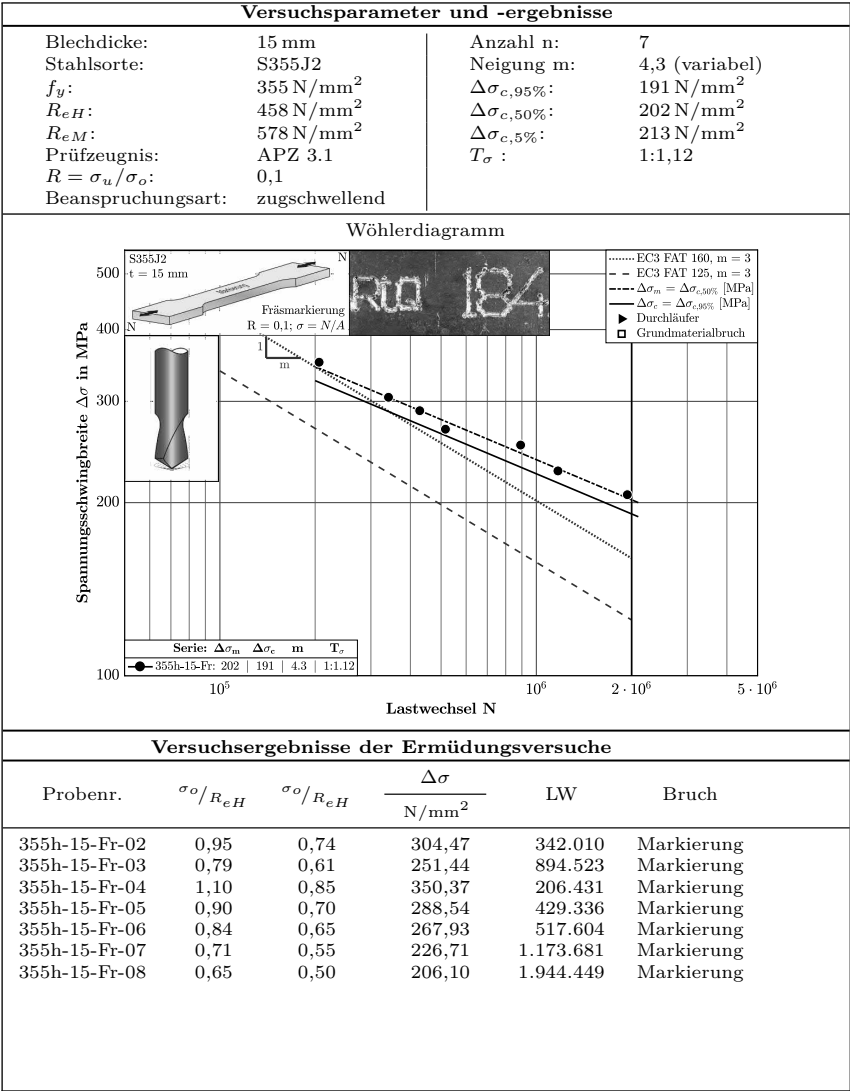
Tab. B.5 Datenblatt Versuchsserie S460h-25-St



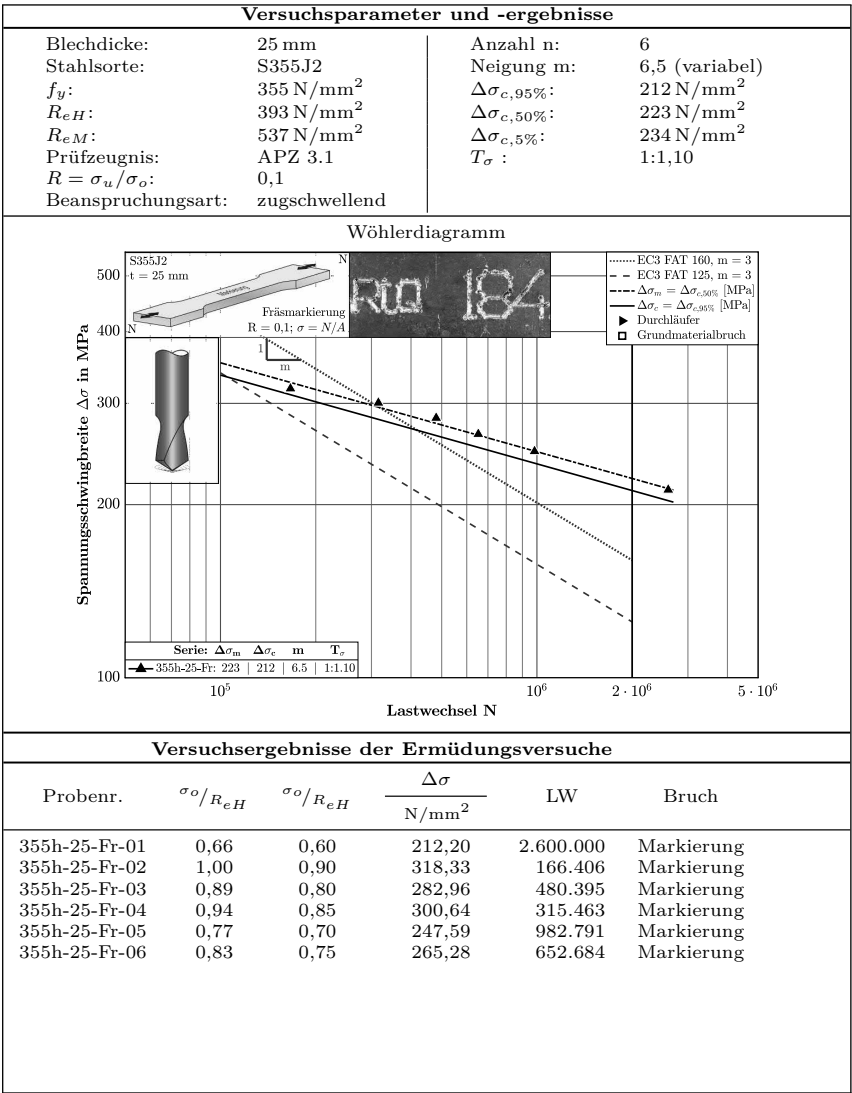
Tab. B.6 Datenblatt Versuchsserie S460h-40-St



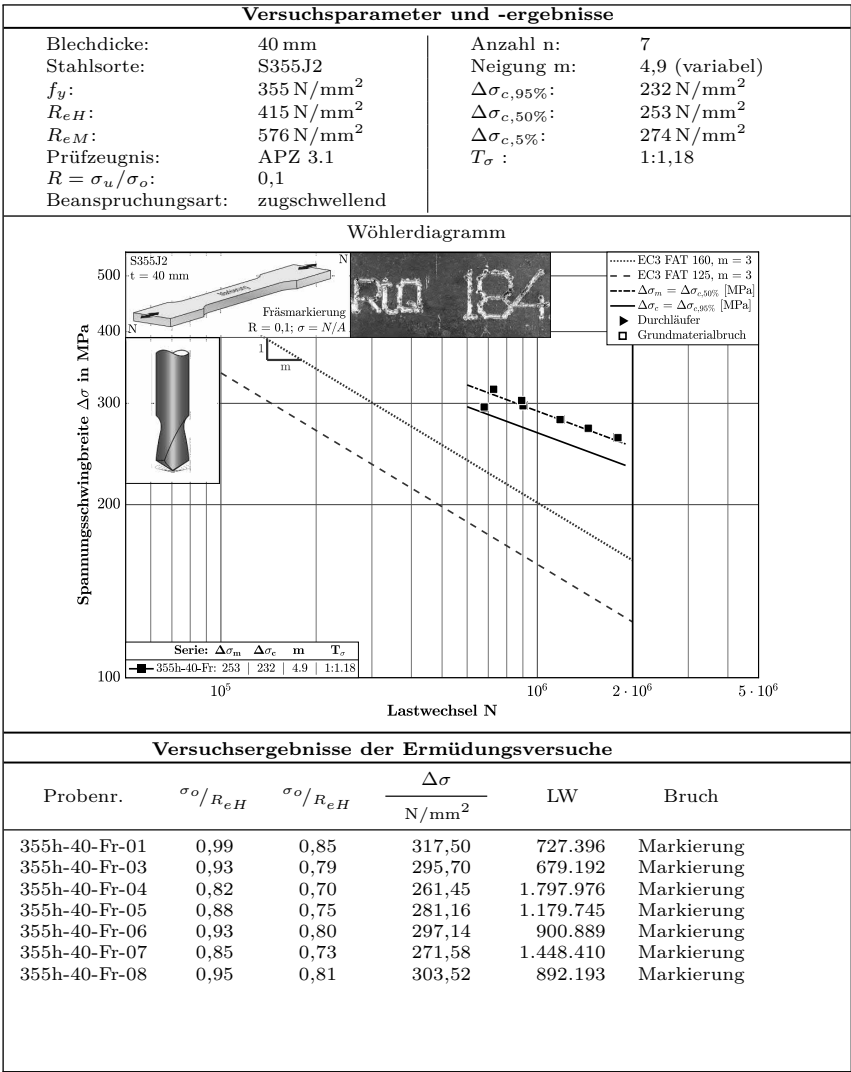
Tab. B.7 Datenblatt Versuchsserie S355h-15-Fr



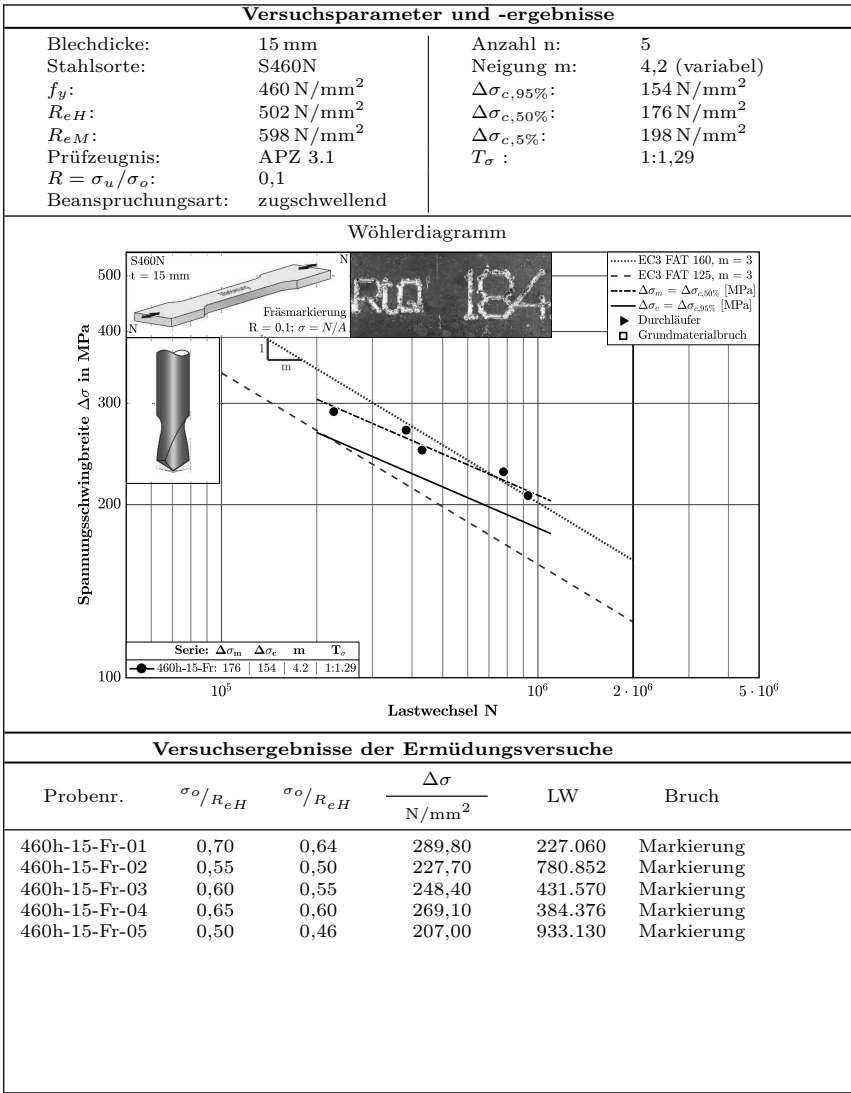
Tab. B.8 Datenblatt Versuchsserie S355h-25-Fr



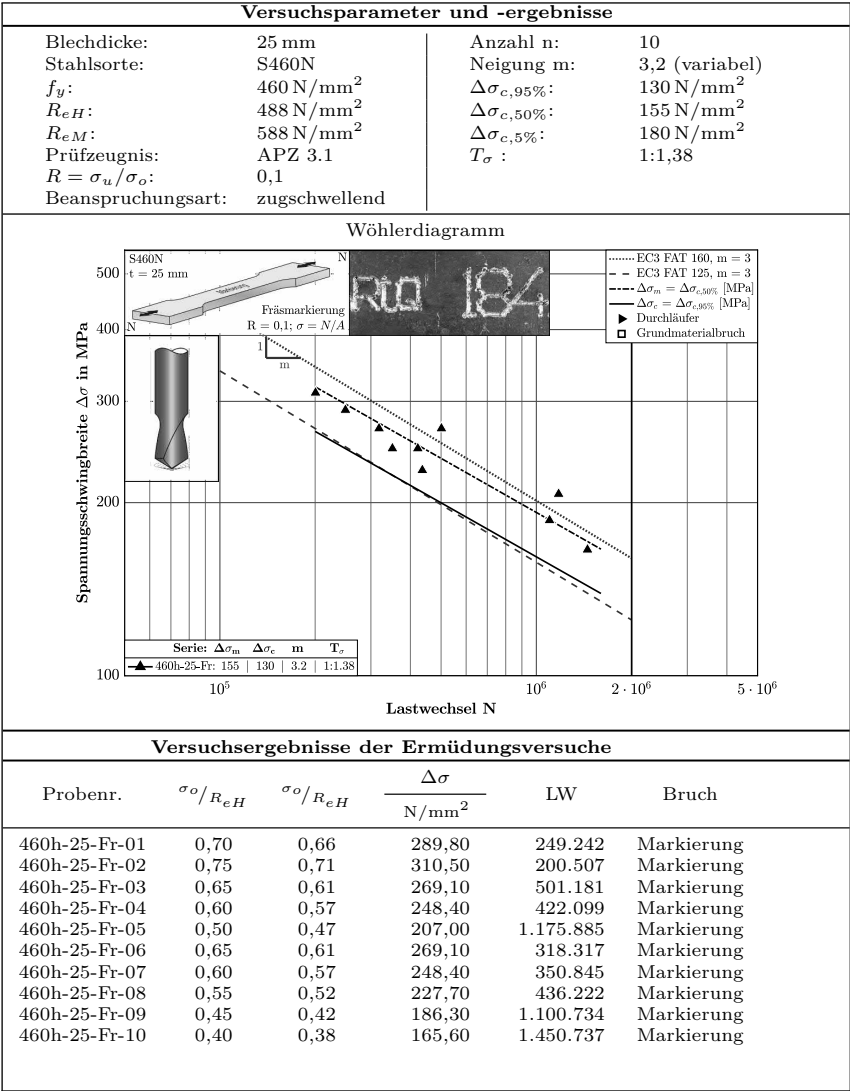
Tab. B.9 Datenblatt Versuchsserie S355h-40-Fr



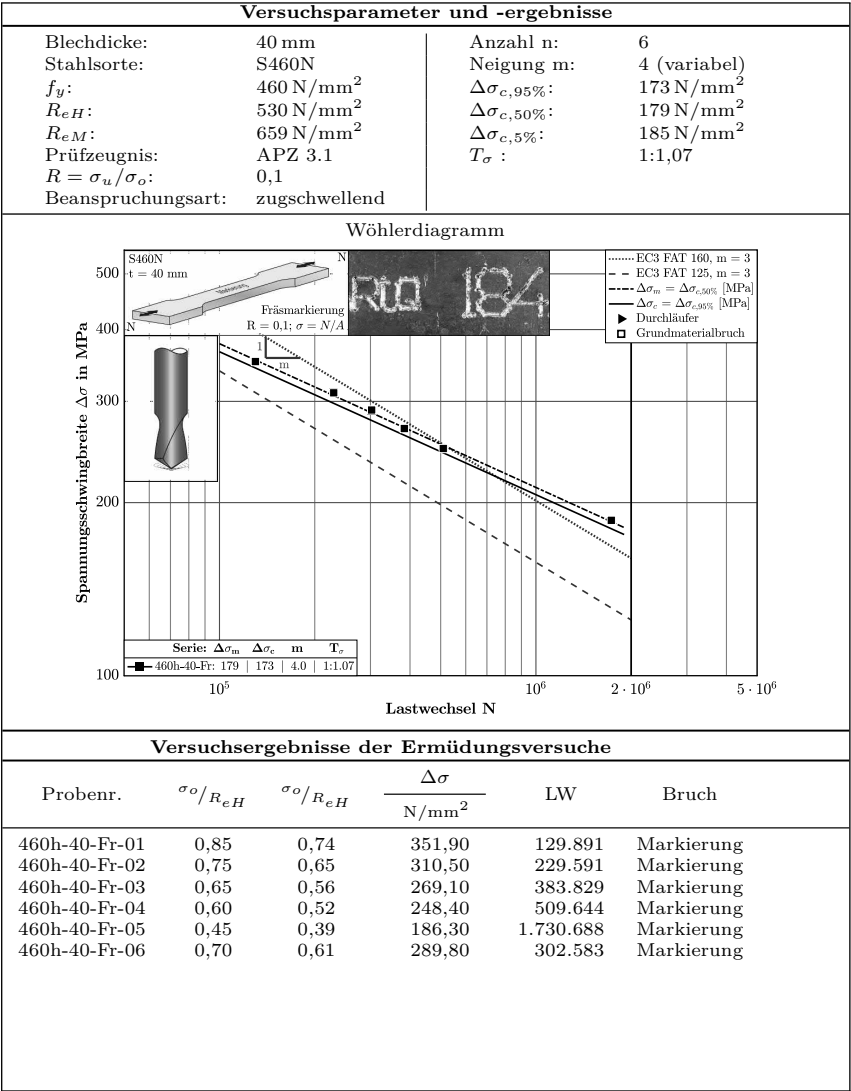
Tab. B.10 Datenblatt Versuchsserie S460h-15-Fr



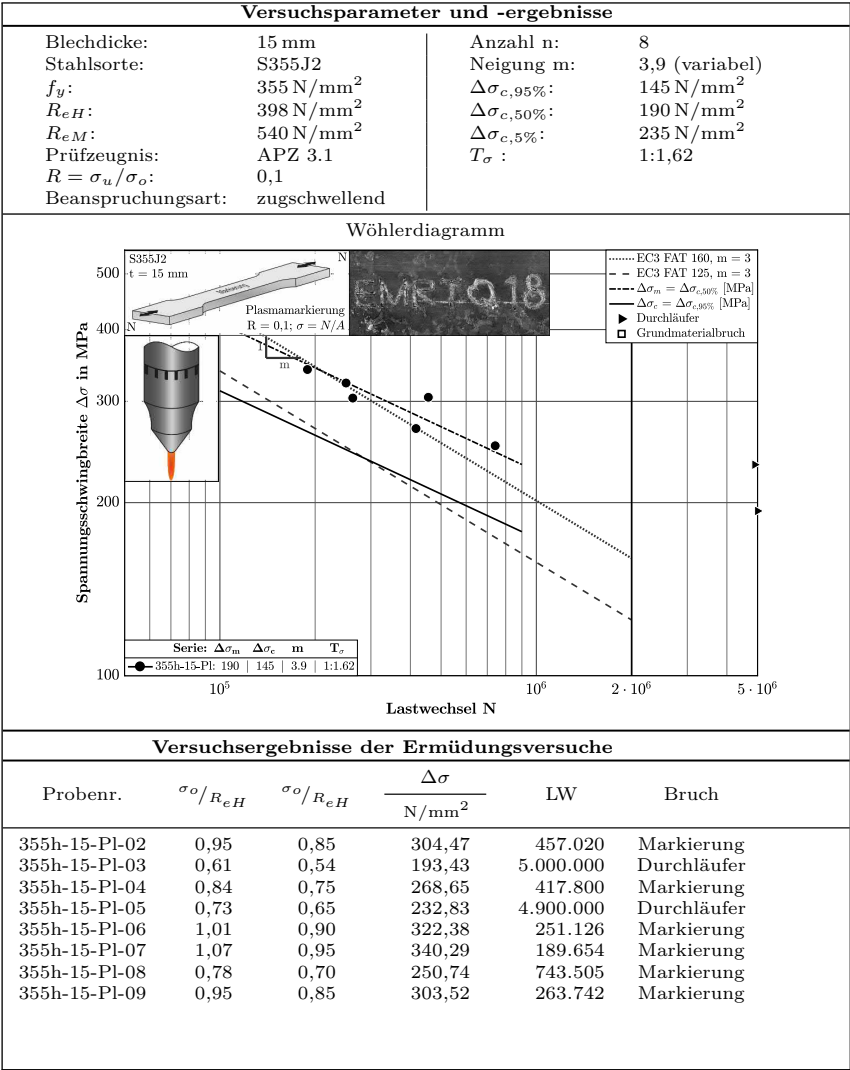
Tab. B.11 Datenblatt Versuchsserie S460h-25-Fr



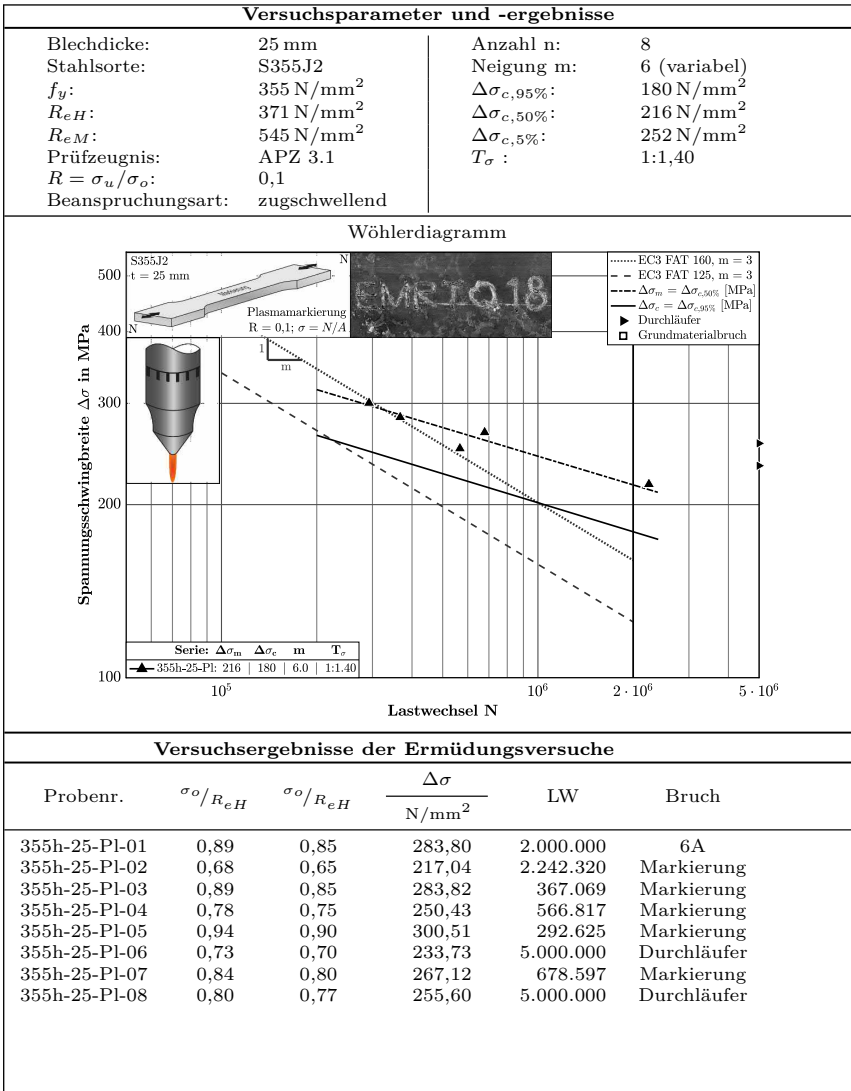
Tab. B.12 Datenblatt Versuchsserie S460h-40-Fr



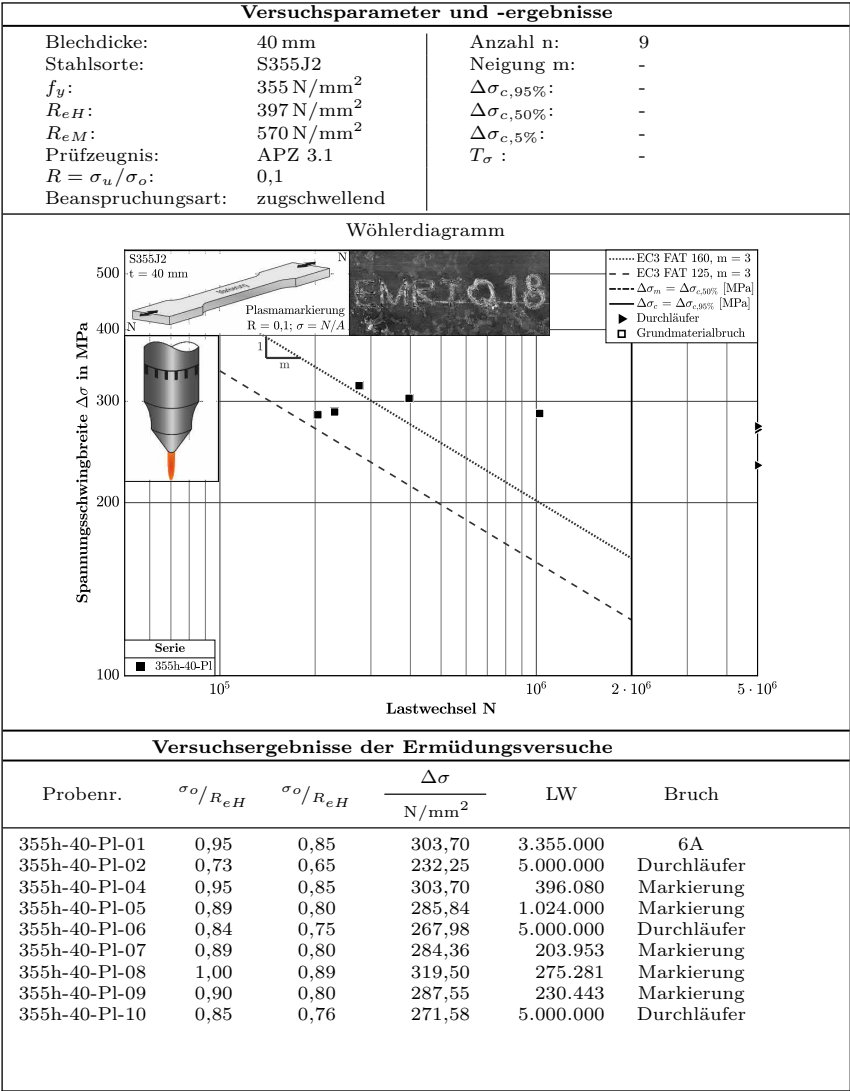
Tab. B.13 Datenblatt Versuchsserie S355h-15-Pl



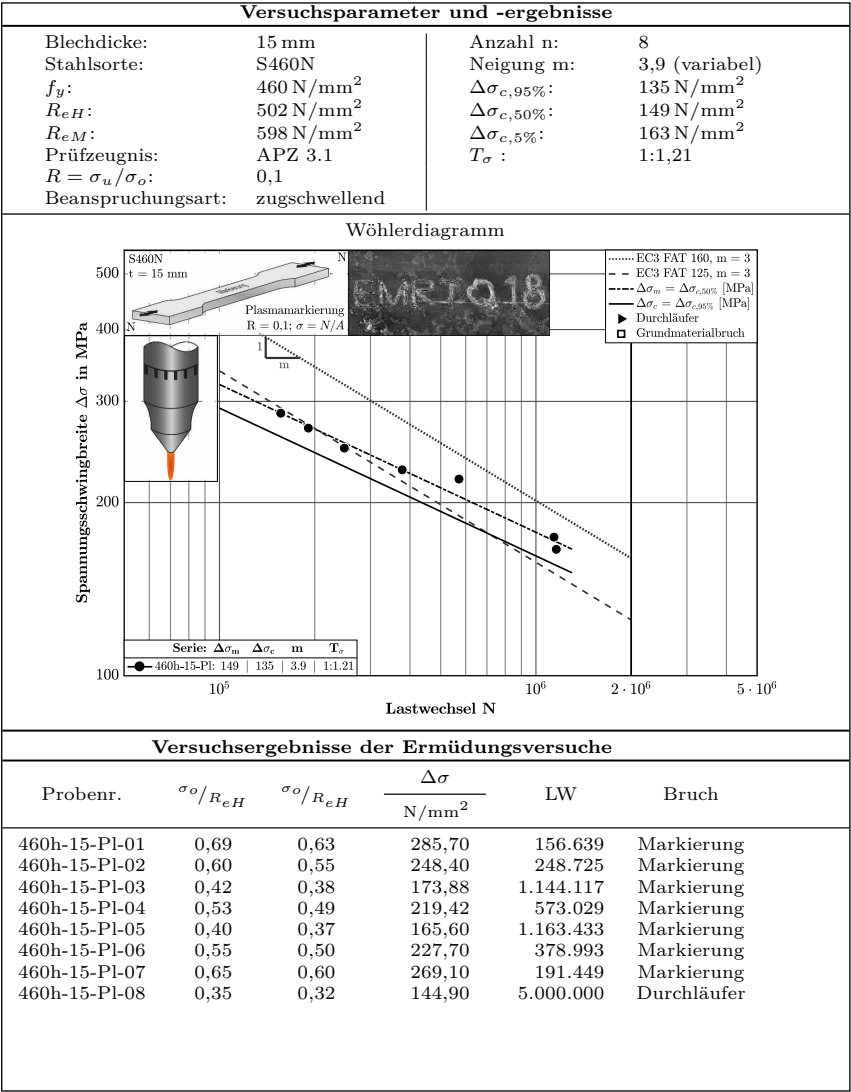
Tab. B.14 Datenblatt Versuchsserie S355h-25-P1



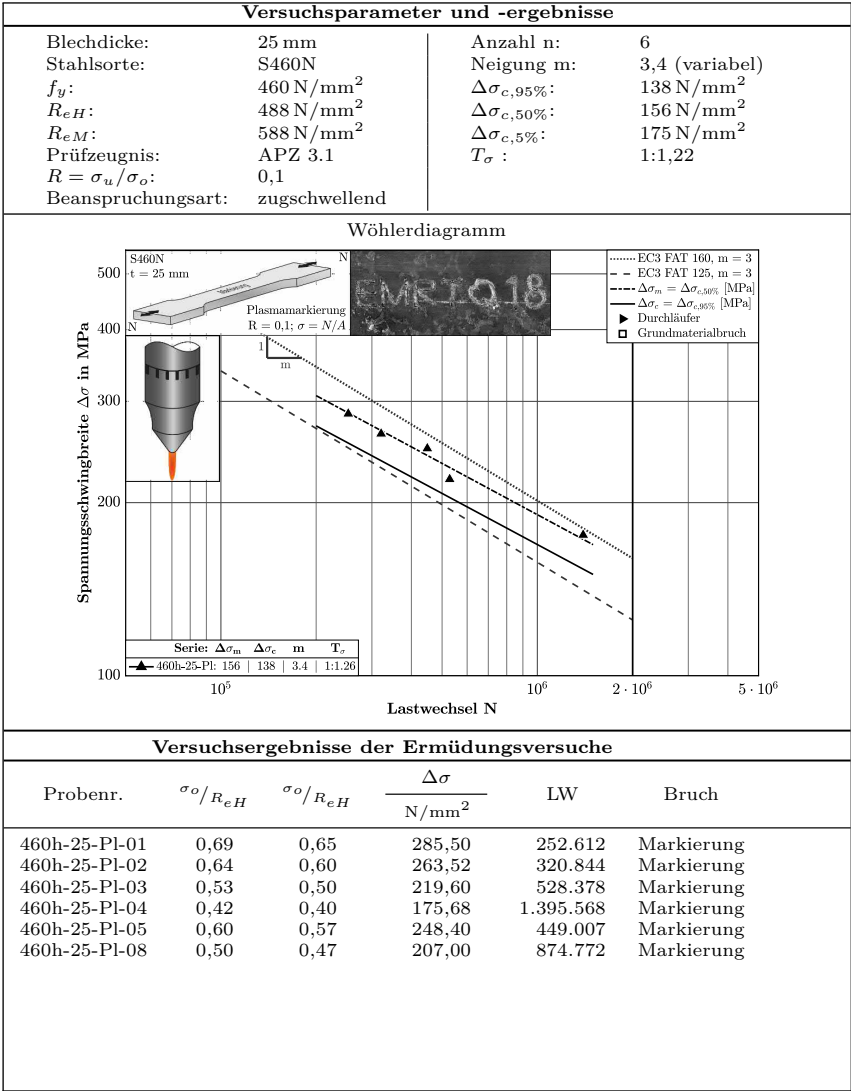
Tab. B.15 Datenblatt Versuchsserie S355h-40-Pl



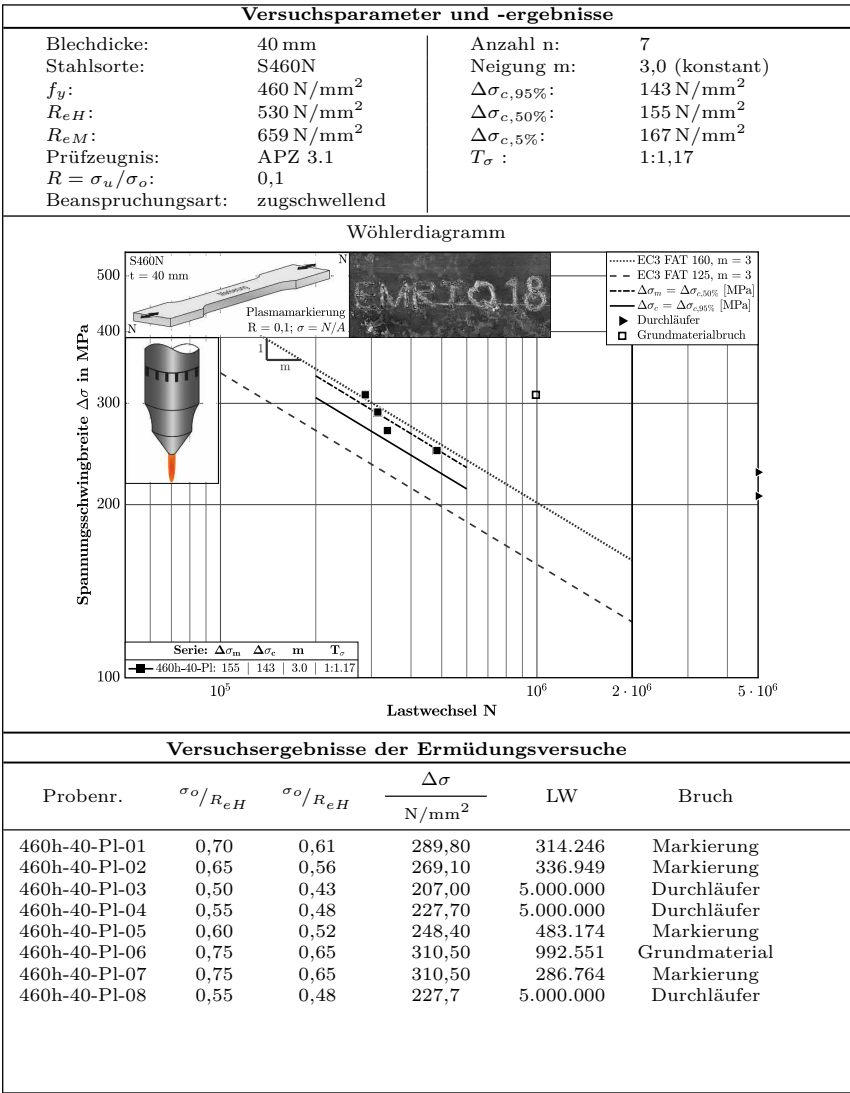
Tab. B.16 Datenblatt Versuchsserie S460h-15-P1



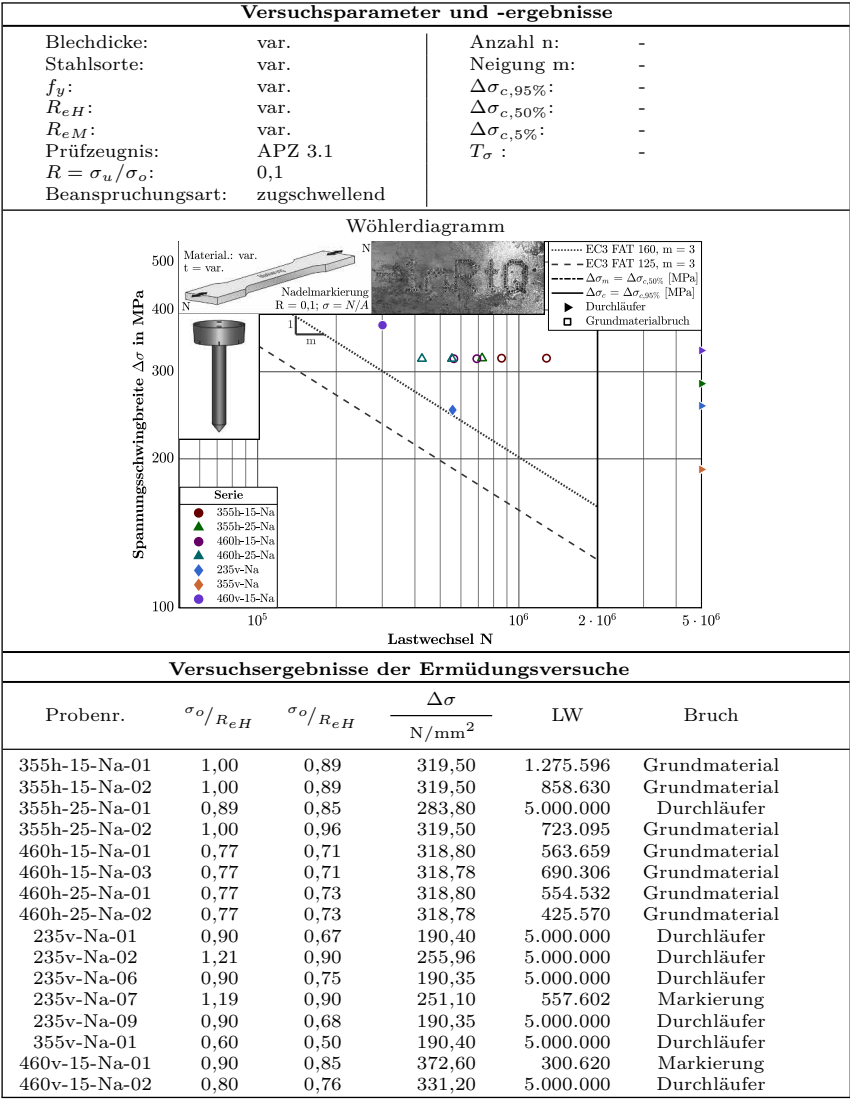
Tab. B.17 Datenblatt Versuchsserie S460h-25-Pl



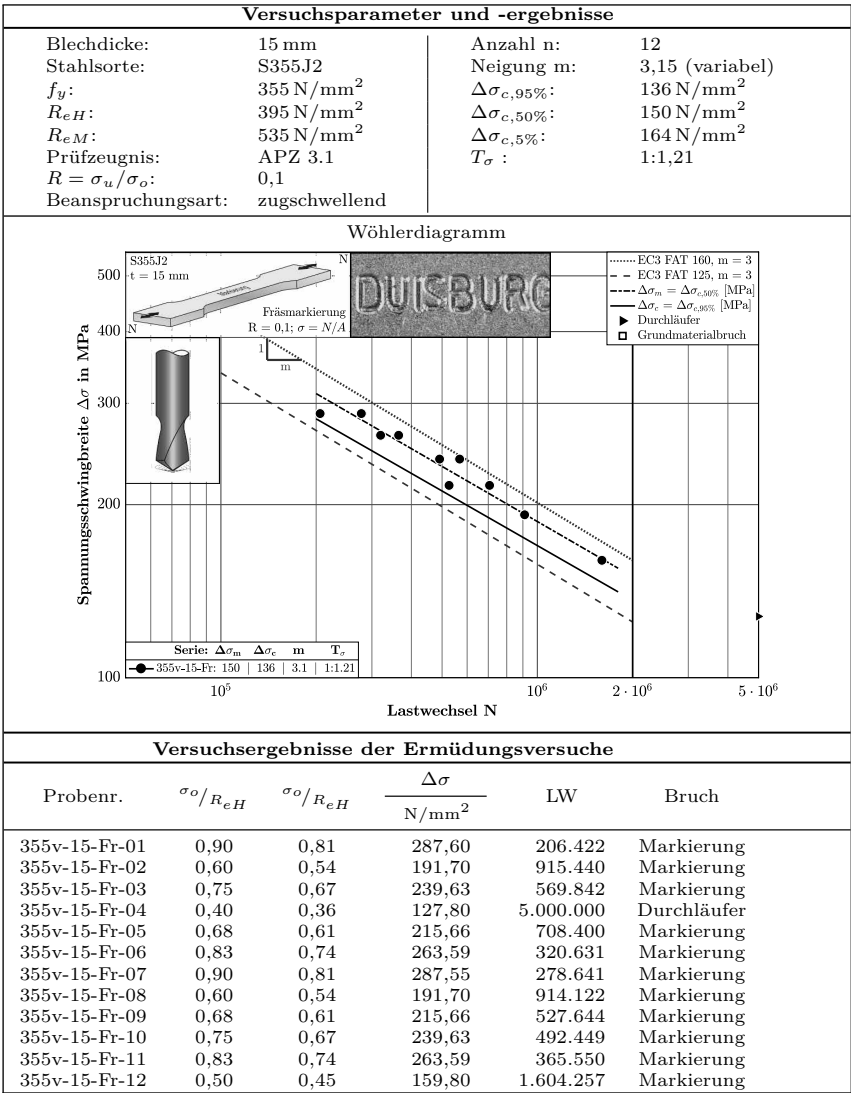
Tab. B.18 Datenblatt Versuchsserie S460h-40-P1



Tab. B.19 Datenblatt Versuchsserie Nadelmarkierungen

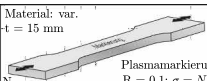



Tab. B.21 Datenblatt Versuchsserie S355v-15-Fr



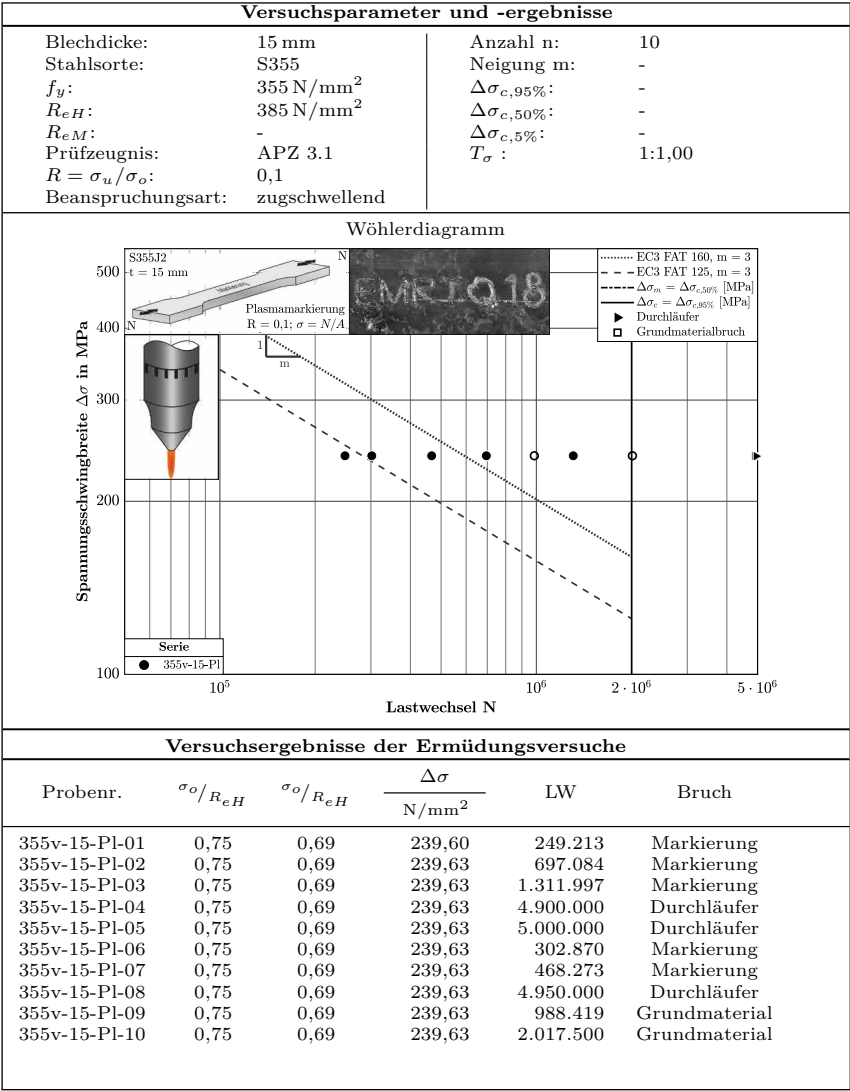
Tab. B.22 Datenblatt Versuchsserie S235v-15-Pl

Versuchsparameter und -ergebnisse			
Blechdicke:	15 mm	Anzahl n:	7
Stahlsorte:	S235	Neigung m:	-
f_y :	235 N/mm ²	$\Delta\sigma_{c,95\%}$:	-
R_{eH} :	271 N/mm ²	$\Delta\sigma_{c,50\%}$:	-
R_{eM} :	-	$\Delta\sigma_{c,5\%}$:	-
Prüfzeugnis:	APZ 3.1	T_σ :	-
$R = \sigma_u / \sigma_o$:	0,1		
Beanspruchungsart:	zugschwellend		

Wöhlerdiagramm	
<div><div>Material: var. t = 15 mm</div><div></div><div>Plasmamarkierung R = 0,1; $\sigma = N/A$</div></div> <div></div> <div><div>Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ in MPa</div><div>400 300 200 100</div></div> <div><div>..... EC3 FAT 160, m = 3 -- EC3 FAT 125, m = 3 - - - $\Delta\sigma_m = \Delta\sigma_{c,50\%}$ [MPa] - - - $\Delta\sigma_s = \Delta\sigma_{c,95\%}$ [MPa] ▶ Durchläufer</div><div><div>Serie</div><div>● 235v-15-Pl</div></div><div><div>10⁵ 10⁶ 2 · 10⁶ 5 · 10⁶</div><div>Lastwechsel N</div></div></div>	

Versuchsergebnisse der Ermüdungsversuche					
Probenr.	σ_o / R_{eH}	σ_o / R_{eH}	$\frac{\Delta\sigma}{N/mm^2}$	LW	Bruch
235v-15-Pl-01	0,90	0,78	190,35	607.203	Markierung
235v-15-Pl-02	0,90	0,78	190,35	788.707	Markierung
235v-15-Pl-03	0,90	0,78	190,35	1.067.457	Markierung
235v-15-Pl-04	0,90	0,78	190,35	1.244.944	Markierung
235v-15-Pl-05	0,90	0,78	190,35	1.375.604	Markierung
235v-15-Pl-06	0,90	0,78	190,35	1.570.360	Markierung
235v-15-Pl-07	0,90	0,78	190,35	1.614.782	Markierung

Tab. B.23 Datenblatt Versuchsserie S355v-15-Pl



C Kerbwirkungszahlen

Tab. C.1 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 1$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
1	3,0	4,52	1,08	1,20	3,8
1	2,5	4,25	1,16	1,20	3,5
1	2,0	3,94	1,26	1,21	3,3
1	1,5	3,56	1,48	1,23	2,9
1	1,2	3,29	1,61	1,24	2,7
1	1,0	3,09	1,67	1,24	2,5
1	0,8	2,87	1,79	1,25	2,3
1	0,6	2,61	1,93	1,26	2,1
1	0,4	2,30	2,11	1,27	1,8

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm
^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.2 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,9$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,9	3,0	4,73	1,15	1,20	3,9
0,9	2,5	4,44	1,24	1,21	3,7
0,9	2,0	4,10	1,34	1,22	3,4
0,9	1,5	3,70	1,58	1,24	3,0
0,9	1,2	3,43	1,72	1,25	2,7
0,9	1,0	3,21	1,82	1,25	2,6
0,9	0,8	2,98	1,94	1,26	2,4
0,9	0,6	2,71	2,08	1,27	2,1
0,9	0,4	2,38	2,32	1,29	1,8

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm
^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.3 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,8$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,8	3,0	4,96	1,23	1,21	4,1
0,8	2,5	4,65	1,31	1,21	3,8
0,8	2,0	4,30	1,42	1,22	3,5
0,8	1,5	3,88	1,70	1,25	3,1
0,8	1,2	3,58	1,86	1,26	2,9
0,8	1,0	3,36	1,97	1,26	2,7
0,8	0,8	3,10	2,10	1,27	2,4
0,8	0,6	2,81	2,29	1,28	2,2
0,8	0,4	2,47	2,53	1,30	1,9

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.4 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,7$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,7	3,0	5,24	1,31	1,22	4,3
0,7	2,5	4,91	1,41	1,22	4,0
0,7	2,0	4,54	1,53	1,23	3,7
0,7	1,5	4,09	1,86	1,26	3,3
0,7	1,2	3,77	2,03	1,27	3,0
0,7	1,0	3,53	2,14	1,28	2,8
0,7	0,8	3,26	2,29	1,28	2,5
0,7	0,6	2,95	2,50	1,30	2,3
0,7	0,4	2,57	2,78	1,31	2,0

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.5 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,6\text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,6	3,0	5,58	1,42	1,22	4,6
0,6	2,5	5,23	1,54	1,23	4,2
0,6	2,0	4,83	1,61	1,24	3,9
0,6	1,5	4,34	2,04	1,27	3,4
0,6	1,2	4,00	2,24	1,28	3,1
0,6	1,0	3,74	2,38	1,29	2,9
0,6	0,8	3,45	2,57	1,30	2,6
0,6	0,6	3,11	2,77	1,31	2,4
0,6	0,4	2,71	3,13	1,33	2,0
0,6	0,2	2,18	3,59	1,36	1,6

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12\text{ mm}$

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.6 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,5\text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,5	3,0	6,02	1,54	1,23	4,9
0,5	2,5	5,64	1,70	1,24	4,5
0,5	2,0	5,20	1,75	1,25	4,2
0,5	1,5	4,67	2,28	1,28	3,6
0,5	1,2	4,30	2,51	1,30	3,3
0,5	1,0	4,02	2,69	1,31	3,1
0,5	0,8	3,69	2,92	1,32	2,8
0,5	0,6	3,33	3,12	1,33	2,5
0,5	0,4	2,88	3,53	1,35	2,1
0,5	0,2	2,30	4,12	1,38	1,7

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12\text{ mm}$

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.7 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,4$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,4	3,0	6,61	1,84	1,26	5,3
0,4	2,5	6,19	1,88	1,26	4,9
0,4	2,0	5,71	2,08	1,27	4,5
0,4	1,5	5,14	2,56	1,30	4,0
0,4	1,2	4,70	2,89	1,32	3,6
0,4	1,0	4,39	3,10	1,33	3,3
0,4	0,8	4,03	3,38	1,35	3,0
0,4	0,6	3,63	3,61	1,36	2,7
0,4	0,4	3,11	4,19	1,38	2,2
0,4	0,2	2,46	4,96	1,42	1,7

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.8 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,3$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,3	3,0	7,45	2,08	1,27	5,9
0,3	2,5	6,98	2,10	1,27	5,5
0,3	2,0	6,43	2,35	1,29	5,0
0,3	1,5	5,77	3,06	1,33	4,3
0,3	1,2	5,29	3,41	1,35	3,9
0,3	1,0	4,93	3,60	1,36	3,6
0,3	0,8	4,52	4,00	1,38	3,3
0,3	0,6	4,04	4,35	1,39	2,9
0,3	0,4	3,46	5,11	1,42	2,4
0,3	0,2	2,70	6,06	1,46	1,8

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.9 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,2\text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,2	3,0	8,78	2,39	1,29	6,8
0,2	2,5	8,25	2,36	1,29	6,4
0,2	2,0	7,62	2,71	1,31	5,8
0,2	1,5	6,84	3,83	1,37	5
0,2	1,2	6,27	4,25	1,39	4,5
0,2	1,0	5,83	4,61	1,40	4,2
0,2	0,8	5,33	5,11	1,43	3,7
0,2	0,6	4,76	5,56	1,44	3,3
0,2	0,4	4,05	6,58	1,48	2,7
0,2	0,1	2,46	10,0	1,59	1,5

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12\text{ mm}$
^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.10 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,1\text{ mm}$ in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,1	3,0	11,41	2,78	1,31	8,7
0,1	2,5	10,81	2,63	1,3	8,3
0,1	2,0	10,07	3,16	1,33	7,5
0,1	1,5	9,09	5,23	1,43	6,4
0,1	1,2	8,36	5,95	1,46	5,7
0,1	1,0	7,79	6,67	1,49	5,2
0,1	0,8	7,12	7,36	1,51	4,7
0,1	0,6	6,34	8,32	1,54	4,1
0,1	0,4	5,35	9,9	1,59	3,4
0,1	0,2	4,04	12,48	1,66	2,4
0,1	0,1	3,08	16,67	1,77	1,7

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12\text{ mm}$
^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl

Tab. C.11 Kerbspannungsfaktoren K_t und Kerbwirkungszahlen β_k für Kerben mit einem Kerbgrundradius $r_k = 0,05$ mm in Baustählen S355J2 und S460N in Abhängigkeit unterschiedlicher Kerbtiefen t_k

$\frac{r_k}{\text{mm}}$	$\frac{t_k}{\text{mm}}$	K_t	χ	$n(\chi)$	β_k^a
0,05	3,0	14,13	2,79	1,31	10,8
0,05	2,5	13,59	2,66	1,31	10,4
0,05	2,0	12,86	3,3	1,34	9,6
0,05	1,5	11,81	6,18	1,47	8,1
0,05	1,2	10,98	7,7	1,52	7,2
0,05	1,0	10,29	9,04	1,57	6,6
0,05	0,8	9,46	9,94	1,59	5,9
0,05	0,6	8,44	12,53	1,67	5,1
0,05	0,4	7,15	13,98	1,7	4,2
0,05	0,2	5,35	17,42	1,78	3
0,05	0,1	4,01	26,8	1,97	2

^a Werte berechnet für einen Öffnungswinkel $\alpha_k = 45^\circ$ und eine Kerblänge $l_k = 12$ mm

^b r_k : Kerbradius | t_k : Kerbtiefe | K_t : Kerbspannungsfaktor | χ : Bezogenes Spannungsgefälle unmittelbar unter der Kerboberfläche | $n(\chi)$: Stützziffer | β_k : Kerbwirkungszahl